UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PALERMO
FACOLTA' DI INGEGNERIA

DISPENSA DEL CORSO DI

TECNICA DELLA SICUREZZA ELETTRICA

(Integrativa del libro di testo)

Prof. Stefano Mangione

RIFERIMENTI LEGISLATIVI E NORMATIVI

1.1 RIFERIMENTI LEGISLATIVI

• Legge 1/3/68 n. 186

"Disposizioni concernenti la produzione di materiali, apparecchiature, macchinari, installazioni e impianti elettrici ed elettronici".

Art. 1 - Tutti i materiali, le apparecchiature, i macchinari, le installazioni e gli impianti elettrici ed elettronici devono essere costruiti e realizzati a regola d'arte.

Art. 2 - I materiali, le apparecchiature, i macchinari, le installazioni e gli impianti elettrici ed elettronici realizzati secondo le norme CEI si considerano costruiti a regola d'arte.

• Decreto 22/01/2008, n. 37 [1]

"Regolamento concernente l'attuazione dell'articolo 11-quaterdecies, comma 13, lettera a) della legge n. 248 del 2 dicembre 2005, recante riordino delle disposizioni in materia di attività di installazione degli impianti all'interno degli edifici". (G. U. n. 61 del 12/03/2008 - in vigore dal 27/03/2008).

Art. 1. - Ambito di applicazione

Si applica agli impianti al servizio degli edifici a partire dal punto di consegna della fornitura, indipendentemente dalla destinazione d'uso, collocati all'interno degli stessi o delle relative pertinenze, quali:

a) impianti di produzione, trasformazione, trasporto, distribuzione, utilizzazione dell'energia elettrica, impianti di protezione contro le scariche atmosferiche, nonché gli impianti per l'automazione di porte, cancelli e barriere;
b) impianti radiotelevisivi, le antenne e gli impianti elettronici in genere;
c) impianti di riscaldamento, di climatizzazione, di condizionamento e di refrigerazione di qualsiasi natura o specie, comprese le opere di evacuazione dei prodotti della combustione e delle condense, e di ventilazione ed aerazione dei locali;
d) impianti idrici e sanitari di qualsiasi natura o specie;
e) impianti per la distribuzione e l'utilizzazione di gas di qualsiasi tipo, comprese le opere di evacuazione dei prodotti della combustione e ventilazione ed aerazione dei locali;
f) impianti di sollevamento di persone o di cose per mezzo di ascensori, di montacarichi, di scale mobili e simili;
g) impianti di protezione antincendio.

Art. 2. - Definizioni relative agli impianti

(Omissis)

Art. 3. - Imprese abilitate

([1]) Tale Decreto sostituisce la **Legge 5/3/1990 n. 46** "Norme per la sicurezza degli impianti". Emanata per mettere ordine in tutto il settore dell'impiantistica, non solo quello elettrico, all'interno degli edifici ad uso civile, la Legge 46/90 era accompagnata da un Regolamento di Attuazione (**DPR 6/12/91 n. 447**) anch'esso abrogato con l'entrata in vigore del DM 37/08.

Sono abilitate all'esercizio delle attività di cui all'art. 1 le imprese iscritte nel Registro delle Imprese (di cui al DPR n. 581/95) o nell'Albo provinciale delle Imprese Artigiane (di cui alla Legge n. 443/85) se l'imprenditore individuale o il legale rappresentante ovvero il responsabile tecnico da essi preposto con atto formale, e' in possesso dei requisiti professionali di cui all'articolo 4.
Le imprese non installatrici, che dispongono di uffici tecnici interni sono autorizzate all'installazione, alla trasformazione, all'ampliamento e alla manutenzione degli impianti, limitatamente alle proprie strutture interne e nei limiti della tipologia di lavori per i quali il responsabile possiede i requisiti previsti all'articolo 4.

Art. 4. - Requisiti tecnico-professionali

Tra i requisiti tecnico-professionali stabiliti dal Decreto vi sono:

- diploma di laurea in materia tecnica specifica;
- diploma o qualifica di scuola secondaria con specializzazione relativa al settore, seguiti da un periodo di inserimento di almeno due anni presso un'impresa del settore;
- titolo o attestato conseguito in materia di formazione professionale, previo un periodo di inserimento di almeno quattro anni, presso un'impresa del settore.
- prestazione lavorativa svolta alle dirette dipendenze di una impresa abilitata per un periodo non inferiore a tre anni, come operaio qualificato nelle attività di installazione, trasformazione, ampliamento e manutenzione degli impianti di cui all'articolo 1.

Art. 5. - Progettazione degli impianti

Secondo il DM 37/08 per tutti gli interventi di installazione di nuovi impianti o di ampliamento o trasformazione di impianti esistenti è obbligatorio il progetto, ad eccezione degli impianti di cui all'art. 1, lettera f (ascensori). Per gli impianti più complessi il progetto deve essere redatto da un professionista iscritto negli albi professionali secondo la specifica competenza tecnica richiesta; per tutti gli altri impianti il progetto può essere eseguito dal responsabile tecnico dell'impresa installatrice.
Per quanto riguarda gli impianti elettrici è richiesto il progetto redatto da parte di un professionista iscritto all'albo nei seguenti casi:

- servizi condominiali con potenza impegnata superiore a 6 kW;
- unità abitative di superficie superiore a 400 m^2, oppure con potenza impegnata superiore a 6 kW;
- unità immobiliari adibite ad attività produttive, al commercio, al terziario e ad altri usi, se alimentate a tensione superiore a 1000 V, inclusa la parte in bassa tensione, o qualora la superficie superi i 200 m^2 o quando le utenze sono alimentate in bassa tensione aventi potenza impegnata superiore a 6 kW;
- impianti elettrici realizzati con lampade fluorescenti a catodo freddo, collegati ad impianti elettrici, per i quali e' obbligatorio il progetto e in ogni caso per impianti di potenza complessiva maggiore di 1200 VA resa dagli alimentatori;
- impianti elettrici relativi ad unità immobiliari provviste, anche solo parzialmente, di ambienti soggetti a normativa specifica del CEI, in caso di locali adibiti ad uso medico o per i quali sussista pericolo di esplosione o a maggior rischio di incendio.

Per gli impianti di protezione da scariche atmosferiche il progetto redatto da parte di un professionista iscritto all'albo è richiesto, oltre che nei primi tre casi di cui sopra, anche in edifici di volume superiore a 200 m^3.

I progetti degli impianti vanno elaborati secondo la regola dell'arte. I progetti elaborati in conformità alla vigente normativa e alle indicazioni delle guide e alle norme dell'UNI, del CEI o di altri Enti di normalizzazione appartenenti agli Stati membri dell'Unione europea si considerano redatti secondo la regola dell'arte.

I progetti contengono almeno gli schemi dell'impianto e i disegni planimetrici nonché una relazione tecnica sulla consistenza e sulla tipologia dell'installazione, della trasformazione o dell'ampliamento dell'impianto stesso, con particolare riguardo alla tipologia e alle caratteristiche dei materiali e componenti da utilizzare e alle misure di prevenzione e di sicurezza da adottare.

Il progetto e' depositato presso lo sportello unico per l'edilizia del comune in cui deve essere realizzato l'impianto nei termini previsti all'articolo 11.

Sono esclusi dagli obblighi della redazione del progetto le installazioni di apparecchi per usi domestici e la fornitura provvisoria di energia elettrica per gli impianti di cantiere e similari, fermo restando l'obbligo del rilascio della dichiarazione di conformità.

Art. 6. - Realizzazione ed installazione degli impianti

Le imprese realizzano gli impianti secondo la regola dell'arte, in conformità alla normativa vigente e sono responsabili della corretta esecuzione degli stessi. Gli impianti realizzati in conformità alla vigente normativa e alle norme dell'UNI, del CEI o di altri Enti di normalizzazione europei si considerano eseguiti secondo la regola dell'arte.

Gli impianti elettrici nelle unità immobiliari ad uso abitativo realizzati prima del 13 marzo 1990 si considerano adeguati se dotati di:

- sezionamento e protezione contro le sovracorrenti posti all'origine dell'impianto;
- protezione contro i contatti diretti;
- protezione contro i contatti indiretti o protezione con interruttore differenziale avente corrente differenziale nominale non superiore a 30 mA.

Art. 7. - Dichiarazione di conformità

Al termine dei lavori, previa effettuazione delle verifiche previste dalla normativa vigente, l'impresa installatrice rilascia al committente la dichiarazione di conformità degli impianti realizzati nel rispetto delle norme di cui all'articolo 6.

Di tale dichiarazione, resa sulla base del modello di cui all'allegato I, fanno parte integrante la relazione contenente la tipologia dei materiali impiegati, nonché il progetto di cui all'articolo 5.

Nei casi in cui il progetto e' redatto dal responsabile tecnico dell'impresa installatrice l'elaborato tecnico e' costituito almeno dallo schema dell'impianto da realizzare.

Per gli impianti eseguiti prima dell'entrata in vigore del decreto, nel caso in cui la dichiarazione di conformità non sia stata prodotta o non sia più reperibile, essa può essere sostituita da una dichiarazione di rispondenza, resa da un professionista iscritto all'albo professionale per le specifiche competenze tecniche richieste, che ha esercitato la professione, per almeno cinque anni, nel settore

impiantistico a cui si riferisce la dichiarazione, sotto personale responsabilità, in esito a sopralluogo ed accertamenti.

Art. 8. - Obblighi del committente o del proprietario

Il committente e' tenuto ad affidare i lavori di installazione, di trasformazione, di ampliamento e di manutenzione straordinaria degli impianti indicati all'art. 1 ad imprese abilitate ai sensi dell'art. 3.

Il proprietario dell'impianto adotta le misure necessarie per conservarne le caratteristiche di sicurezza previste dalla normativa vigente in materia, tenendo conto delle istruzioni per l'uso e la manutenzione predisposte dall'impresa installatrice dell'impianto e dai fabbricanti delle apparecchiature installate.

Il committente entro 30 giorni dall'allacciamento di una nuova fornitura di gas, energia elettrica, acqua, negli edifici di qualsiasi destinazione d'uso, consegna al distributore copia della dichiarazione di conformità dell'impianto, esclusi i relativi allegati obbligatori, o copia della dichiarazione di rispondenza. La medesima documentazione e' consegnata nel caso di richiesta di aumento di potenza impegnata a seguito di interventi sull'impianto.

Art. 9. - Certificato di agibilità

Il certificato di agibilità e' rilasciato dalle autorità competenti previa acquisizione della dichiarazione di conformità, nonché del certificato di collaudo degli impianti installati, ove previsto dalle norme vigenti.

Art. 10. - Manutenzione degli impianti

(Omissis)

Art. 11.- Deposito del progetto e della dichiarazione di conformità

Per le opere di installazione, trasformazione e ampliamento di impianti in edifici per i quali e' già stato rilasciato il certificato di agibilità, entro 30 giorni dalla conclusione dei lavori, l'impresa installatrice deposita la dichiarazione di conformità ed il progetto presso lo sportello unico per l'edilizia del comune ove ha sede l'impianto, redatto ai sensi dell'articolo 5, o il certificato di collaudo degli impianti installati, ove previsto dalle norme vigenti.

Lo sportello unico inoltra copia della dichiarazione di conformità alla Camera di commercio (CCIAA) nella cui circoscrizione ha sede l'impresa esecutrice dell'impianto, per i controlli di competenza.

Il progetto relativo a impianti connessi ad interventi edilizi per i quali è richiesto il permesso di costruire o la denuncia di inizio attività, deve essere depositato presso lo sportello unico per l'edilizia del comune ove deve essere realizzato l'intervento dal soggetto titolare del permesso di costruire o che ha presentato la denuncia di inizio di attività, contestualmente al progetto edilizio.

Art. 15. – Sanzioni

(Omissis)

DICHIARAZIONE DI CONFORMITA' DELL'IMPIANTO ALLA REGOLA DELL'ARTE
D.M. 22 gennaio 2008, n. 37

Il sottoscritto .....
titolare o legale rappresentante dell'impresa (ragione sociale) .....
operante nel settore ..... con sede in via .....
..... n. ..... comune ..... (prov. ....) tel. .....
part. IVA .....
☐ iscritta nel registro delle imprese (d.P.R. 7/12/1995, n. 581)
della Camera C.I.A.A. di ..... n. .....
☐ iscritta all'albo Provinciale delle imprese artigiane (l. 8/8/1985, n. 443) di ..... n. .....
esecutrice dell'impianto (descrizione schematica) .....
.....
inteso come: ☐ nuovo impianto ☐ trasformazione ☐ ampliamento ☐ manutenzione straordinaria
☐ altro (1).....

Nota - Per gli impianti a gas specificare il tipo di gas distribuito: canalizzato della 1a - 2a - 3a famiglia; GPL da recipienti mobili; GPL da serbatoio fisso. Per gli impianti elettrici specificare la potenza massima impegnabile.

commissionato da: ..... installato nei locali siti
nel comune di ..... (prov. .....) via ..... n. ..... scala.....
piano ..... interno ..... di proprietà di (nome, cognome o ragione sociale e indirizzo)
.....
in edificio adibito ad uso: ☐ industriale ☐ civile ☐ commercio ☐ altri usi;

DICHIARA

sotto la propria personale responsabilità, che l'impianto è stato realizzato in modo conforme alla regola dell'arte, secondo quanto previsto dall'art. 6, tenuto conto delle condizioni di esercizio e degli usi a cui è destinato l'edificio, avendo in particolare:
☐ rispettato il progetto redatto ai sensi dell'art. 5 da (2) .....;
☐ seguito la norma tecnica applicabile all'impiego (3) .....;
.....;
☐ installato componenti e materiali adatti al luogo di installazione (artt. 5 e 6);
☐ controllato l'impianto ai fini della sicurezza e della funzionalità con esito positivo, avendo eseguito le verifiche richieste dalle norme e dalle disposizioni di legge.

Allegati obbligatori:
☐ progetto ai sensi degli articoli 5 e 7 (4);
☐ relazione con tipologie dei materiali utilizzati (5);
☐ schema di impianto realizzato (6);
☐ riferimento a dichiarazioni di conformità precedenti o parziali, già esistenti (7);
☐ copia del certificato di riconoscimento dei requisiti tecnico-professionali.

Allegati facoltativi (8):
☐ .....
☐ .....

DECLINA

ogni responsabilità per sinistri a persone o a cose derivanti da manomissione dell'impianto da parte di terzi ovvero da carenze di manutenzione o riparazione.

	Il responsabile tecnico	Il dichiarante
data	.....	.....
	(timbro e firma)	(timbro e firma)

AVVERTENZE PER IL COMMITTENTE: responsabilità del committente o del proprietario, art. 8 (9)
.....
.....

Legenda:

1) Come esempio nel caso di impianti a gas, con "altro" si può intendere la sostituzione di un apparecchio installato in modo fisso.

2) Indicare: nome, cognome, qualifica e, quando ne ricorra l'obbligo ai sensi dell'articolo 5, comma 2, estremi di iscrizione nel relativo Albo professionale, del tecnico che ha redatto il progetto.

3) Citare la o le norme tecniche e di legge, distinguendo tra quelle riferite alla progettazione, all'esecuzione e alle verifiche.

4) Qualora l'impianto eseguito su progetto sia variato in opera, il progetto presentato alla fine dei lavori deve comprendere le varianti realizzate in corso d'opera.
Fa parte del progetto la citazione della pratica prevenzione incendi (ove richiesta).

5) La relazione deve contenere, per i prodotti soggetti a norme, la dichiarazione di rispondenza alla stesse completata, ove esistente, con riferimenti a marchi, certificati di prova, ecc. rilasciati da istituti autorizzati.
Per gli altri prodotti (da elencare) il firmatario deve dichiarare che trattasi di materiali, prodotti e componenti conformi a quanto previsto dagli articoli 5 e 6. La relazione deve dichiarare l'idoneità rispetto all'ambiente di installazione.
Quando rilevante ai fini del buon funzionamento dell'impianto, si devono fornire indicazioni sul numero e caratteristiche degli apparecchi installati od installabili (ad esempio per il gas: 1) numero, tipo e potenza degli apparecchi; 2) caratteristiche dei componenti il sistema di ventilazione dei locali; 3) caratteristiche del sistema di scarico dei prodotti della combustione: 4) indicazioni sul collegamento elettrico degli apparecchi, ove previsto).

6) Per schema dell'impianto realizzato si intende la descrizione dell'opera come eseguita (si fa semplice rinvio al progetto quando questo è stato redatto da un professionista abilitato e non sono state apportate varianti in corso d'opera).
Nel caso di trasformazione, ampliamento e manutenzione straordinaria, l'intervento deve essere inquadrato, se possibile, nello schema dell'impianto preesistente.
Lo schema citerà la pratica prevenzione incendi (ove richiesto).

7) I riferimenti sono costituiti dal nome dell'impresa esecutrice e dalla data della dichiarazione.
Per gli impianti o parti di impianti costruiti prima dell'entrata in vigore del presente decreto, il riferimento a dichiarazioni di conformità può essere sostituito dal rinvio a dichiarazioni di rispondenza (art. 7, comma 6).
Nel caso che parte dell'impianto sia predisposto da altra impresa (ad esempio ventilazione e scarico fumi negli impianti a gas), la dichiarazione deve riportare gli analoghi riferimenti per dette parti.

8) Esempio: eventuali certificati dei risultati delle verifiche eseguite sull'impianto prima della messa in esercizio o trattamenti per pulizia, disinfezione, ecc.

9) Al termine dei lavori l'impresa installatrice è tenuta a rilasciare al committente la dichiarazione di conformità degli impianti nel rispetto delle norme di cui all'art. 7.
Il committente o il proprietario è tenuto ad affidare i lavori di installazione, di trasformazione, di ampliamento e di manutenzione degli impianti di cui all'art. 1 ad imprese abilitate ai sensi dell'art. 3.

• D.P.R. 22 ottobre 2001, n. 462

"Regolamento di semplificazione del procedimento per la denuncia di installazioni e dispositivi di protezione contro le scariche atmosferiche, di dispositivi di messa a terra di impianti elettrici e di impianti elettrici pericolosi (GU n. 6 del 8-1-2002).

Art. 1. - Ambito di applicazione

1. Il presente regolamento disciplina i procedimenti relativi alle installazioni ed ai dispositivi di protezione contro le scariche atmosferiche, agli impianti elettrici di messa a terra e agli impianti elettrici in luoghi con pericolo di esplosione collocati nei luoghi di lavoro.

- Impianti elettrici di messa a terra e dispositivi di protezione contro le scariche atmosferiche

Art. 2. - Messa in esercizio e omologazione dell'impianto

1. La messa in esercizio degli impianti elettrici di messa a terra e dei dispositivi di protezione contro le scariche atmosferiche non puo' essere effettuata prima della verifica eseguita dall'installatore che rilascia la dichiarazione di conformità ai sensi della normativa vigente. La dichiarazione di conformità equivale a tutti gli effetti ad omologazione dell'impianto.

2. Entro trenta giorni dalla messa in esercizio dell'impianto, il datore di lavoro invia la dichiarazione di conformità all'ISPESL ed all'ASL o all'ARPA territorialmente competenti.

Art. 3. - Verifiche a campione

1. L'ISPESL effettua a campione la prima verifica sulla conformità alla normativa vigente degli impianti di protezione contro le scariche atmosferiche ed i dispositivi di messa a terra degli impianti elettrici e trasmette le relative risultanze all'ASL o ARPA.

(Omissis)

Art. 4. - Verifiche periodiche - Soggetti abilitati

1. Il datore di lavoro e' tenuto ad effettuare regolari manutenzioni dell'impianto, nonché a far sottoporre lo stesso a verifica periodica ogni cinque anni, ad esclusione di quelli installati in cantieri, in locali adibiti ad uso medico e negli ambienti a maggior rischio in caso di incendio per i quali la periodicità e' biennale.

2. Per l'effettuazione della verifica, il datore di lavoro si rivolge all'ASL o all'ARPA o ad eventuali organismi individuati dal Ministero delle attività produttive, sulla base di criteri stabiliti dalla normativa tecnica europea UNI CEI.

3. Il soggetto che ha eseguito la verifica periodica rilascia il relativo verbale al datore di lavoro che deve conservarlo ed esibirlo a richiesta degli organi di vigilanza.

4. Le verifiche sono onerose e le spese per la loro effettuazione sono a carico del datore di lavoro.

- Impianti in luoghi con pericolo di esplosione

Art. 5. - Messa in esercizio e omologazione

1. La messa in esercizio degli impianti in luoghi con pericolo di esplosione non può essere effettuata prima della verifica di conformità rilasciata al datore di lavoro ai sensi del comma 2.

2. Tale verifica e' effettuata dallo stesso installatore dell'impianto, il quale rilascia la dichiarazione di conformità ai sensi della normativa vigente.
3. Entro trenta giorni dalla messa in esercizio dell'impianto, il datore di lavoro invia la dichiarazione di conformità all'ASL o all'ARPA territorialmente competenti.
4. L'omologazione e' effettuata dalle ASL o dall'ARPA competenti per territorio, che effettuano la prima verifica sulla conformità alla normativa vigente di tutti gli impianti denunciati.
5. Nei comuni singoli o associati ove e' stato attivato lo sportello unico per le attività produttive la dichiarazione di cui al comma 3 è presentata allo sportello.
6. Le verifiche sono onerose e le spese per la loro effettuazione sono a carico del datore di lavoro.

Art. 6. - Verifiche periodiche - Soggetti abilitati

1. Il datore di lavoro e' tenuto ad effettuare regolari manutenzioni dell'impianto, nonché a far sottoporre lo stesso a verifica periodica ogni due anni.
2. Per l'effettuazione della verifica, il datore di lavoro si rivolge all'ASL o all'ARPA od ad eventuali organismi individuati dal Ministero delle attività produttive, sulla base di criteri stabiliti dalla normativa tecnica europea UNI CEI.
3. Il soggetto che ha eseguito la verifica periodica rilascia il relativo verbale al datore di lavoro che deve conservarlo ed esibirlo a richiesta degli organi di vigilanza.
4. Le verifiche sono onerose e le spese per la loro effettuazione sono a carico del datore di lavoro.

(Omissis)

- Disposizioni transitorie e finali

Art. 9. - Abrogazioni

1. Sono abrogati:
a) gli articoli 40 e 328 del decreto del Presidente della Repubblica 27 aprile 1955, n. 547;
b) gli articoli 2, 3 e 4 del decreto del Ministro per il lavoro e la previdenza sociale in data 12 settembre 1959, nonché i modelli A, B e C allegati al medesimo decreto.
2. I riferimenti alle disposizioni abrogate contenute in altri testi normativi si intendono riferiti alle disposizioni del presente regolamento.
3. Il presente regolamento si applica anche ai procedimenti pendenti alla data della sua entrata in vigore.

Spett. I.S.P.E.S.L. – Dipartimento di Palermo
Via Francesco Crispi, 108 – 90139 Palermo

Spett. AUSL 6 - Servizio Dipartimentale Medicina del Lavoro
U.O. Impiantistica Antinfortunistica
Via Mariano Stabile, 7 - 90139 Palermo

Riservato all'Ufficio

OGGETTO: TRASMISSIONE DELLA DICHIARAZIONE DI CONFORMITA' PER LA MESSA IN ESERCIZIO DELL'IMPIANTO *(Art. 2, comma 2 e art. 5 comma 3, DPR 22 Ottobre 2001 N° 462)*

DI MESSA A TERRA
DI PROTEZIONE DALLE SCARICHE ATMOSFERICHE
ELETTRICO IN LUOGO CON PERICOLO DI ESPLOSIONE (D.M. 22/12/58 TAB A e B) (1)

IL SOTTOSCRITTO _____ IN QUALITA' DI DATORE DI LAVORO DELLA DITTA _____ CON SEDE SOCIALE IN _____ VIA _____ CAP _____ TELEFONO _____ C.F./P.IVA _____, sottoposto agli obblighi del DPR 462/2001 (art. 2.2), per la presenza di personale subordinato, trasmette la dichiarazione di conformità relativa all'impianto in oggetto realizzato presso l'insediamento produttivo ubicato in:
COMUNE:_____ VIA _____ CAP _____
Impianto installato dalla Ditta _____ con sede in _____
via _____ c.a.p. _____ tel. _____

ATTIVITA' DELLA DITTA

1.	CANTIERE, data presumibile chiusura _____	5.	EDIFICIO SCOLASTICO, persone presenti _____
2.	OSPEDALE / CASA DI CURA, posti letto _____	6.	LOCALE DI PUBBLICO SPETTACOLO, persone presenti _____
3.	AMBULATORIO MEDICO		
4.	CENTRO ESTETICO	7.	ILLUMINAZIONE PUBBLICA

8. STABILIMENTO INDUSTRIALE (specificare) _____
9. AMBIENTE AGRICOLO (specificare) _____
10. COMMERCIO (specificare) _____ MQ _____
11. TERZIARIO (specificare) _____
12. ALTRE ATTIVITA' (specificare) _____
13. LUOGO A MAGGIOR RISCHIO DI INCENDIO (specificare) _____
14. LUOGO CON PERICOLO DI ESPLOSIONE IN CUI SONO PRESENTI, IN LAVORAZIONE E/O IN DEPOSITO, MATERIALI ELENCATI NELLE TAB. A – B DEL D.M. 22/12/58 (specificare) _____

DATI IMPIANTO

NUMERO ADDETTI _____ POTENZA INSTALLATA _____ KW
DISPERSORI N. _____ (da indicare se la potenza è maggiore di 25 kW) CABINE DI TRASFORMAZIONE N. _____
IMPIANTO ELETTRICO ALIMENTATO:
IN BASSA TENSIONE IN MEDIA TENSIONE DA GRUPPO AUTONOMO DI PRODUZIONE
PERIODICITA' PREVISTA PER LA VERIFICA PERIODICA DELL'IMPIANTO (ART 4 DPR 22/10/2001 N° 462) :
BIENNALE (Cantiere, Locale ad uso medico, Luogo a maggior rischio d'incendio, Luogo con pericolo di esplosione)
QUINQUENNALE (Ambiente ordinario)

IMPIANTO DI PROTEZIONE DALLE SCARICHE ATMOSFERICHE

PARAFULMINI AD ASTA	SI	NO	N._____	
PARAFULMINI A GABBIA	SI	NO	N._____	superficie protetta mq _____
STRUTTURE, RECIPIENTI E SERBATOI METALLICI	SI	NO	N._____	
CAPANNONI METALLICI	SI	NO	N._____	
STRUTTURE METALLICHE IN CANTIERI EDILI	SI	NO	N._____	

Il sottoscritto dichiara che l'impianto è soggetto / non è soggetto all'obbligo di progetto ai sensi della Legge 46/90 e del D.P.R. 447/91 e che la documentazione tecnica e gli allegati obbligatori alla dichiarazione di conformità (progetto o schema impianto, relazione con tipologia dei materiali, ecc..) sono conservati presso il luogo di installazione / allegati (solo per impianti elettrici in luoghi con pericolo di esplosione) (2); ulteriori documentazioni relative all'impianto saranno tempestivamente prodotte ove richiesto. Dichiara inoltre di essere soggetto all'obbligo di far eseguire la regolare manutenzione all'impianto, nonché le visite periodiche, da far effettuare da parte dei soggetti individuati dall'art.4.2 del D.P.R. 462/01.

IL DATORE DI LAVORO *(timbro e firma)*

DATA _____

_____

(1) INDICARE SOLAMENTE NELLA COPIA DA TRASMETTERE ALLA A.U.S.L.
(2) DOCUMENTAZIONE DA ALLEGARE, ALLA COPIA DA TRASMETTERE ALLA AUSL, NECESSARIA PER LE OPERAZIONI DI VERIFICA.

Modello di trasmissione della Dichiarazione di Conformità (per le province PA-TP)

• TESTO UNICO SULLA SICUREZZA NEI LUOGHI DI LAVORO

DLgs 9/4/08, n. 81 "Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro". (G. U. n. 101 del 30/04/2008).

In Italia ci sono circa 3 morti al giorno sul lavoro, e quasi un milione di incidenti l'anno. Per migliorare la sicurezza sul lavoro, più che inasprire le sanzioni, occorrere un monitoraggio costante dei luoghi di lavoro, al fine di valutarne attentamente i rischi presenti e adottare le necessarie misure di protezione.
A questa filosofia si ispira il DLgs 81/08. Questa norma raccoglie in un unico testo molte leggi precedentemente emanate in tema di sicurezza sul lavoro, introduce cambiamenti e novità ed abroga, tra l'altro, il DLgs 626/94 e il vecchio DPR 547/55. Il legislatore adesso non stabilisce più, come in passato (vedi DPR547/55), regole tecniche e non indica più i modi per conseguire la sicurezza, ma stabilisce il fine da conseguire.
In primo luogo fa carico al datore di lavoro di raggiungere l'obiettivo della sicurezza attraverso l'analisi e la valutazione del rischio, a cui deve seguire l'adozione delle necessarie misure di protezione.
Accanto al datore di lavoro sono coinvolti nell'opera di prevenzione, ciascuno per la parte di propria competenza: il progettista, il costruttore, l'installatore, il dirigente, il responsabile per la prevenzione e protezione, il preposto, il manutentore e il lavoratore.
La valutazione del rischio e la predisposizione delle adeguate misure di sicurezza è un compito delicato e difficile, colmo di responsabilità. Per fortuna , il rischio nel settore elettrico è valutato da oltre un secolo in sede normativa internazionale, dove viene anche concordato in modo consensuale il livello di sicurezza accettabile e la conseguente regola dell'arte.
Il problema per gli elettrici, dunque, non è la valutazione del rischio ma l'applicazione delle relative norme di sicurezza al caso specifico.
A tal fine, il tecnico deve conoscere non solo le regole, ma soprattutto i fondamenti tecnici che sono alla base della normativa. Questa conoscenza è indispensabile per la comprensione e corretta applicazione delle norme.
Con il nuovo Testo unico sulla sicurezza nei luoghi di lavoro, sono scomparsi molti vincoli tecnici imposti dal vecchio DPR 547/55. Senza tali vincoli, il tecnico deve applicare le misure di protezione ritenute necessarie e nel far questo si deve confrontare con la normativa tecnica (CEI, UNI, CENELEC).
Le norme tecniche non sono norme di legge e sono facoltative; godono però della presunzione di regola dell'arte anche da parte del Testo unico sulla sicurezza nei luoghi di lavoro.

1.2 LA NORMATIVA NEL SETTORE ELETTRICO

• Norme CEI

Il Comitato Elettrotecnico Italiano (CEI) è un'associazione senza fini di lucro il cui compito, su delega del Consiglio Nazionale delle Ricerche, è quello di "stabilire i requisiti che devono avere i materiali, le macchine, le apparecchiature e gli impianti elettrici perché essi rispondano alle regole della buona elettrotecnica e i criteri con i quali detti requisiti debbono essere controllati".

Le norme CEI concorrono, in pratica, a definire la regola dell'arte sulla base di precisi criteri di sicurezza, tenuto anche conto della costante evoluzione tecnologica.

Il CEI ha costituito dei Comitati Tecnici, ciascuno dei quali si occupa di un determinato ramo dell'elettrotecnica (Terminologia, Segni grafici, Macchine rotanti, Materiali isolanti, Impianti utilizzatori, etc. per un totale di 116 CT).

A fare parte di tali comitati vengono chiamati esperti del settore, provenienti da laboratori di ricerca, università, industrie, produttori ed utilizzatori.

I Comitati redigono dei progetti di Norma che vengono sottoposti ad inchiesta pubblica, affinché chiunque interessato possa fare pervenire al CEI le proprie osservazioni e proposte di modifica. Tenendo conto anche delle eventuali osservazioni pervenute, i Comitati alla fine compilano il testo definitivo che, dopo l'approvazione degli organi preposti, viene pubblicato.

Di notevole importanza, per i contenuti del corso, sono:

- CEI 64-8 Impianti elettrici utilizzatori a tensione nominale non superiore a 1.000 V in c.a. e 1500 V in c.c.
- CEI 11-1 Impianti elettrici con tensione superiore a 1 kV in corrente alternata
- CEI 31-30 Impianti elettrici in luoghi con pericolo di esplosione
- CEI 64-4 Impianti elettrici in locali adibiti ad uso medico
- CEI 81-10 Protezione delle strutture contro i fulmini

• Norme IEC e CENELEC

Sul piano internazionale operano associazioni analoghe al CEI, con il compito di favorire una normalizzazione delle Normative tra i vari Stati membri.

- IEC (*International Electrical Commission*): agisce a livello mondiale;
- CENELEC (*European Committee for Electrotecnical Standardization*): agisce in sede europea, per i paesi aderenti alla CEE.

Le Norme CEI corrispondono, per la maggior parte, ad altrettante Norme IEC o CENELEC.

Il CENELEC emette:

- Documenti di armonizzazione (HD) i cui contenuti tecnici devono essere introdotti nelle Norme dei Paesi membri;
- Norme europee (EN) che devono essere tradotte e adottate quali Norme nazionali.

A partire dal 1992, le Norme Europee vengono recepite direttamente dal CEI con la numerazione CEI EN, a cui viene aggiunta la consueta classificazione CEI. Tali Norme vengono presentate nella traduzione italiana con a fronte il testo inglese originale.

1.3 DIRETTIVE CEE

A livello europeo, allo scopo di facilitare gli scambi commerciali tra i paesi membri della comunità, vengono emanate delle direttive in materia di sicurezza.

La direttiva è un messaggio che la Comunità invia ai paesi membri, con l'invito perentorio ad adeguare entro il tempo indicato, la propria legislazione nazionale ai contenuti della direttiva.

• Direttiva n. 73/23 del 19/2/1973

In essa vengono indicate in linee generali le caratteristiche a cui devono rispondere i materiali elettrici impiegati in impianti con tensione fino 1.000 V c.a. o 1.500 V c.c. Tale Direttiva, recepita in Italia con la Legge 18/10/77 n. 791, richiede inoltre agli Stati membri l'emissione di Norme specifiche per ogni tipo di materiale e la designazione degli Enti incaricati in ogni paese alla redazione di dette Norme e alla verifica della rispondenza dei materiali alle Norme stesse, rilasciando certificati e marchi di conformità.

Con successivi Decreti lo Stato Italiano ha:

- designato il CEI quale organismo di normalizzazione elettrotecnica ed elettronica in Italia;
- indicato l'Istituto Nazionale Galileo Ferraris (INGF) di Torino, l'Istituto Italiano per il Marchio di qualità (IMQ) di Milano ed il Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano (CESI) di Milano come organismi designati a rilasciare certificati di conformità, e l'IMQ a rilasciare marchi di conformità alle caratteristiche stabilite dalla Direttiva e dalla Legge suddetta;
- recepito e pubblicato nell'ordinamento giuridico italiano i testi delle varie Norme armonizzate;
- vietato la commercializzazione in Italia di materiali e prodotti non rispondenti alle Norme stesse.

1.4 CONFORMITA' ALLE NORME DEI MATERIALI

La conformità dei materiali elettrici alle Norme che li concernono può essere attestata con due diversi segni grafici:

• Contrassegno CEI

Riguarda grossi macchinari e apparecchi di uso industriale. La conformità del materiale alle prescrizioni delle Norme relative è garantita dal Costruttore stesso, il quale deve richiedere al CEI l'uso del contrassegno e sottoporre il materiale ad eventuali controlli.

• Marchio IMQ

Riguarda materiali di grande consumo in ambito domestico. E' rilasciato dall'Istituto Italiano del Marchio di Qualità, il quale condiziona l'autorizzazione all'apposizione del marchio stesso al superamento di tre fasi di verifiche:

- *approvazione del costruttore* (si verifica se il costruttore ha attrezzature idonee alla produzione di materiali della qualità richiesta);
- *approvazione del prototipo*, che viene sottoposto a tutte le prove previste dalle Norme corrispondenti;
- *controllo periodico della produzione*, per assicurarsi che questa conservi una qualità costante.

I due marchi CEI e IMQ sono alternativi tra loro e non obbligatori: i materiali ammessi al contrassegno CEI non possono essere sottoposti al marchio IMQ, e viceversa. Le Norme relative ad un prodotto portano l'indicazione se esso è ammesso a portare il contrassegno CEI o quello IMQ.

• La marcatura CE

E' stata introdotta con la direttiva 93/68 che ha integrato la direttiva 73/23 ed esteso i princìpi di quella direttiva anche ad altri prodotti non elettrici.

Ogni prodotto conforme alle indicazioni di una direttiva deve recare la marcatura CE, qualora la direttiva stessa lo preveda.

E' il costruttore ad apporre il simbolo CE sull'apparecchio dopo avere sottoscritto una dichiarazione che quell'apparecchio è conforme alle prescrizioni della direttiva, o delle direttive che lo riguardano.

Per apporre il simbolo CE il costruttore deve seguire una procedura stabilita dalla direttiva stessa; la procedura può cambiare da prodotto a prodotto ed è tanto più restrittiva quanto più il prodotto è pericoloso. Si va dalla predisposizione del fascicolo tecnico e la dichiarazione di conformità da parte del costruttore, per le procedure più semplici, al divieto di inizio della produzione senza la preventiva approvazione del prototipo del prodotto da parte di un organismo notificato, ai fini della omologazione, per quelle più restrittive.

Per il materiale elettrico è stata scelta la procedura più semplice, in base alla quale per il costruttore è sufficiente predisporre il fascicolo tecnico e sottoscrivere la dichiarazione di conformità CE.

CAPITOLO 2

PROTEZIONE CONTRO I CONTATTI INDIRETTI IN ALTA TENSIONE

2.1 INTRODUZIONE

Negli impianti utilizzatori in bassa tensione (sistemi di I categoria) la sicurezza delle persone nei confronti dei contatti indiretti può essere in genere realizzata mediante il coordinamento tra il dispositivo automatico di interruzione del circuito di alimentazione e l'impianto di terra al quale sono collegate le masse delle apparecchiature (sistemi TT). A favore della sicurezza ci si riferisce alla tensione di contato a vuoto, ipotizzando che essa sia uguale alla tensione totale di terra. Ciò porta a limitare la resistenza di terra R_E del dispersore ad opportuni valori, in dipendenza delle caratteristiche del dispositivo di protezione. L'efficacia dell'impianto di terra in tal caso non dipende dalla particolare geometria del dispersore, il quale può essere facilmente realizzato con elementi disperdenti semplici (picchetto, anello, ecc...) purché in grado di realizzare un opportuno valore di R_E; inoltre, se il dispositivo di protezione è un interruttore differenziale ad alta sensibilità la resistenza di terra può avere anche valori elevati.

In media e alta tensione (sistemi di II e III categoria) il riferimento per la sicurezza delle persone non può più essere la tensione totale di terra, ovvero la resistenza del dispersore, come per i sistemi in bassa tensione. Ciò perché in tali sistemi la corrente a terra è spesso talmente elevata da non rendere possibile l'interruzione del guasto in tempi sufficientemente brevi per la protezione delle persone, in relazione al valore assunto dalla tensione totale di terra. D'altra parte, sia il valore della corrente di guasto a terra che il tempo di intervento dei dispositivi di protezione dipendono dalle caratteristiche del sistema di alimentazione dell'Ente distributore e vanno considerati come parametri indipendenti del sistema. Ai fini della sicurezza delle persone, dunque, riferendosi necessariamente per tali sistemi alle tensioni di contatto e di passo (tensioni pericolose), occorre realizzare un adeguato impianto di terra che, in tutta l'area interessata dalla dispersione della corrente a terra, mantenga le tensioni pericolose a valori inferiori ai limiti stabiliti dalle norme, in dipendenza del tempo di intervento del dispositivo di protezione.

Le tensioni di contatto e di passo dipendono sia dalla tensione totale di terra del dispersore, e quindi dalla sua resistenza di terra, sia dai potenziali che si stabiliscono sulla superficie del terreno. Pertanto, l'efficacia del dispersore nel contenere le tensioni pericolose è tanto più elevata quanto minore è la sua resistenza di terra e quanto più esso è in grado di realizzare una elevato grado di equipotenzialità sulla superficie del terreno. In particolare, nei sistemi in alta tensione, dove si hanno dimensioni spesso notevoli dell'impianto e valori molto elevati della corrente di guasto a terra, il dispersore deve necessariamente essere complesso e avere una geometria tale da garantire un livello di sicurezza quanto più uniforme in tutta l'area dell'impianto. Il dispersore più adatto in tal caso è quello costituito da un insieme di elementi disperdenti lineari interrati orizzontalmente e connessi tra di loro in modo da formare una maglia uniforme, eventualmente integrato da altri elementi disperdenti verticali (dispersori a picchetto) opportunamente posizionati lungo il perimetro della maglia.

Nel seguito, dopo avere introdotto una metodologia generale di calcolo applicabile ai dispersori di forma complessa, viene studiato il comportamento dei dispersori magliati con e senza picchetti, di varie caratteristiche e dimensioni, in terreno supposto omogeneo, analizzando gli effetti della forma e del posizionamento degli elementi disperdenti sulla tensione totale di terra e sulla distribuzione del potenziale sulla superficie del terreno, e quindi sulle tensioni di contatto e di passo. Vengono inoltre suggeriti strumenti di calcolo e indicazioni che il progettista può opportunamente utilizzare per la scelta e il dimensionamento di tali dispersori.

2.2 ELETTRODO LINEARE - METODO DELLE SORGENTI EQUIVALENTI

Un dispersore complesso, quale quello a maglie, può essere pensato costituito da un insieme di dispersori cilindrici rettilinei di diametro molto piccolo rispetto alla loro lunghezza. Un dispersore rettilineo a sua volta può essere studiato sostituendo ad esso una sorgente lineare ideale di corrente disposta sul suo asse, pensata questa come una successione di sorgenti puntiformi.

Supposta la sorgente lineare di lunghezza L (Fig. 2.1), disperdente in un mezzo omogeneo indefinito di resistività ρ la corrente I con densità assiale costante, ad un tratto elementare $d\zeta$ può essere associata la corrente elementare:

$$\frac{I\,d\varsigma}{L} \tag{2.1}$$

Il potenziale prodotto da tale sorgente, che possiamo considerare anche puntiforme, in un punto P di coordinate (x, y) è:

$$dU = \frac{\rho}{4\pi r}\frac{I\,d\varsigma}{L} \tag{2.2}$$

dove $r = \sqrt{(x-\varsigma)^2 + y^2}$

Il potenziale complessivo assunto dal punto P è dunque:

$$U = \frac{\rho}{4\pi}\frac{I}{L}\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \frac{d\varsigma}{\sqrt{(x-\varsigma)^2 + y^2}} = \frac{\rho I}{4\pi L}\ln\frac{x+\frac{L}{2}+\sqrt{\left(x+\frac{L}{2}\right)^2 + y^2}}{x-\frac{L}{2}+\sqrt{\left(x-\frac{L}{2}\right)^2 + y^2}} \tag{2.3}$$

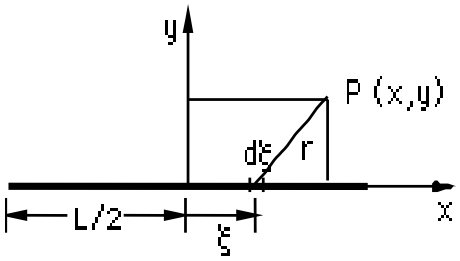


Fig. 2.1

Pertanto le superfici equipotenziali risultano essere delle ellissoidi di rotazione e le loro tracce sul piano x-y sono delle ellissi confocali, i cui fuochi coincidono con gli estremi del segmento L, mentre le linee di corrente iperbole aventi gli stessi fuochi. Se l'asse minore delle ellissi è molto piccolo, rispetto

all'asse maggiore, si hanno delle superfici equipotenziali praticamente cilindriche terminanti con delle calotte.

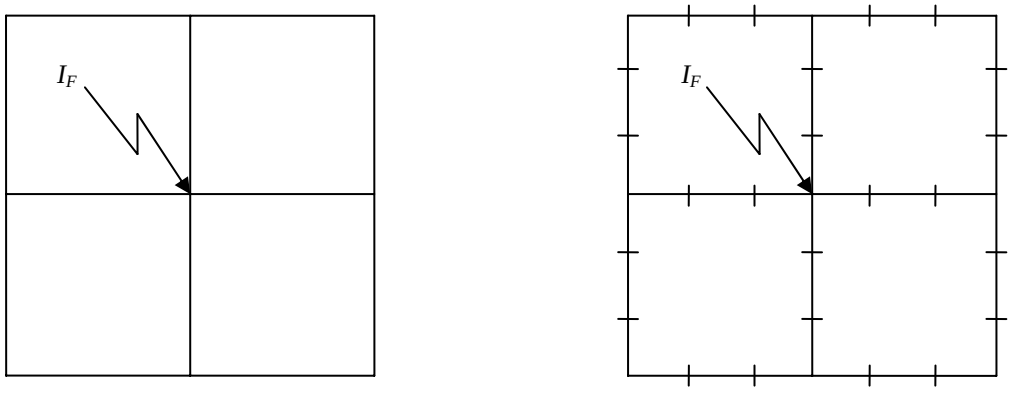
In definitiva, quindi, possiamo ammettere che la superficie cilindrica del dispersore rettilineo reale coincide quasi totalmente (a meno delle parti terminali) con una di tali superfici equipotenziali e assimilare pertanto il campo di corrente da esso prodotto nel mezzo a quello prodotto da una sorgente lineare disposta sul proprio asse.

2.3 METODO DI CALCOLO PER DISPERSORI COMPLESSI

La determinazione per via analitica delle prestazioni di dispersori di forma complessa, quali quelli a maglia, è in genere molto laboriosa. Ciò deriva dal fatto che per dispersori estesi e non dotati di particolari simmetrie non è possibile ricavare in modo immediato il potenziale indotto nei vari punti del campo, giacché la distribuzione della densità di corrente nel dispersore non è uniforme e, in generale, non è nota a priori. Ad esempio, la densità di corrente erogata da un elemento cilindrico rettilineo interrato orizzontalmente assume valori massimi in corrispondenza delle estremità e un valore minimo al centro; se è interrato verticalmente (picchetto) la densità di corrente è maggiore nell'estremità più profonda. E' pertanto necessario in questi casi utilizzare opportuni programmi di calcolo o eseguire lo studio su modelli alla vasca elettrolitica.

Il metodo delle sottoaree di Maxwell, che sfrutta il principio di sovrapposizione degli effetti della corrente, consente di determinare le caratteristiche elettriche di dispersori comunque complessi in modo sufficientemente approssimato e si presta bene ad essere implementato al calcolatore.

Si consideri un dispersore magliato chiamato a disperdere la corrente di guasto a terra I_F (Fig. 2.2-a) e si supponga di suddividere i vari elementi cilindrici rettilinei che lo compongono in tante parti elementari (Fig. 2.2-b), di lunghezza molto piccola, in modo da potere ritenere che la densità della corrente erogata da ciascuna di esse sia uniforme anche se di intensità diversa rispetto alle altre parti. Il campo di corrente stabilito nel terreno da tali elementi, supposti di piccolo diametro rispetto alla lunghezza, può essere investigato impiegando il metodo delle sorgenti equivalenti, cioè attribuendo a sorgenti lineari ideali di lunghezza finita (disposte sull'asse degli elettrodi) l'erogazione della corrente che, in realtà, viene trasferita al terreno in corrispondenza della superficie degli elettrodi.



a) *b)*

Fig. 2.2

Le correnti parziali dei diversi elementi, ossia le intensità di corrente delle sorgenti, sono incognite e la prima fase del procedimento di calcolo ha come scopo la loro determinazione.

Nell'ipotesi di suddividere il dispersore in n parti, indicando con V_i il potenziale assunto dall'i-esimo elemento erogante la corrente I_i e applicando il principio di sovrapposizione degli effetti si possono scrivere n relazioni del tipo:

$$V_i = r_{i1}I_1 + r_{i2}I_2 + \cdots + r_{ii}I_i + \cdots + r_{in}I_n$$

(2.4)

che possono essere espresse in forma compatta mediante la notazione matriciale:

$$[\boldsymbol{V}] = [\boldsymbol{R}] \cdot [\boldsymbol{I}] \qquad (2.5)$$

dove gli elementi della matrice [$\boldsymbol{R}$] con indici uguali sono i "*coefficienti di potenziale proprio*" e dipendono dalla resistività del terreno, dalle dimensioni e dalla posizione rispetto alla superficie del terreno dell'elemento a cui si riferiscono; mentre gli elementi con indici diversi sono i "*coefficienti di potenziale indotto*" e dipendono anche dalla distanza tra le coppie degli elementi cui si riferiscono.

Supposto il dispersore immerso a piccola profondità in un terreno omogeneo, il generico elemento r_{ii} della diagonale principale si ottiene come somma del coefficiente di potenziale proprio dell'elemento i-esimo e del coefficiente di potenziale indotto dalla relativa immagine rispetto alla superficie del terreno. Il generico elemento r_{ij} extra-diagonale è dato invece dalla somma del coefficiente di potenziale mutuo tra l'elemento indotto i-esimo e l'elemento j-esimo, assunto come inducente, e del coefficiente di potenziale indotto dall'immagine rispetto alla superficie del terreno dell'elemento j-esimo sull'elemento i-esimo.

Con riferimento alla Fig. 2.3, si considerino due generici elementi uno indotto (i) e l'altro inducente (j), quest'ultimo disperdente una corrente unitaria con densità lineare uniforme in corrispondenza del proprio asse.

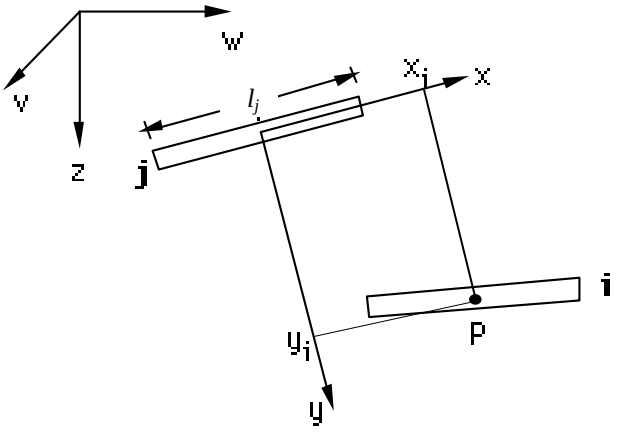


Fig. 2.3

Il potenziale indotto sull'elemento i-esimo in corrispondenza del punto medio di una sua generatrice (ad esempio la generatrice superiore nel caso di elementi orizzontali o inclinati) fornisce il seguente contributo dell'elemento inducente reale sul coefficiente r_{ij}:

$$r_{ij} = \frac{\rho}{4\pi l_j} ln \frac{x_i + \frac{l_j}{2} + \sqrt{\left(x_i + \frac{l_j}{2}\right)^2 + {y_i}^2}}{x_i - \frac{l_j}{2} + \sqrt{\left(x_i - \frac{l_j}{2}\right)^2 + {y_i}^2}} \tag{2.6}$$

Ad esso occorre aggiungere il contributo su r_{ij} dell'elemento inducente immagine di j rispetto alla superficie del terreno.

Ponendo nella (2.6) $x_i = 0$ e $y_i = d/2$ (con d diametro del conduttore) si ottiene il contributo sul coefficiente di potenziale proprio (r_{jj}) dell'elemento reale stesso a cui va aggiunto il contributo della sua immagine rispetto alla superficie del terreno.

Calcolata la matrice [R], se si fa l'ipotesi di assumere tutti gli elementi del dispersore equipotenziali (si trascura la caduta interna del dispersore di resistenza molto più piccola rispetto a quella del terreno circostante), ossia si pone:

$$V_1 = V_2 = \cdots = V_i = \cdots = V_n = V_E \tag{2.7}$$

e, in particolare, si considera unitario il vettore [V], la (2.5) può essere risolta rispetto alle sole incognite I_i; la somma delle correnti I^*_i così ottenute fornisce la corrente totale I^*_F che il dispersore erogherebbe nell'ipotesi di tensione totale di terra unitaria, diversa dalla I_F assegnata.

Il rapporto tra la tensione totale di terra di un dispersore e la corrente da esso dispersa per definizione è pari alla sua resistenza di terra:

$$\frac{V_E}{\sum I_i^*} = \frac{1}{I_F^*} = R_E \tag{2.8}$$

Ricavata in tal modo la resistenza di terra complessiva del dispersore, il prodotto di R_E per la effettiva corrente di guasto I_F assegnata fornisce la effettiva tensione totale di terra V_E, il cui valore rappresenta il fattore di scala per cui bisogna moltiplicare le correnti prima ricavate per ottenere quelle effettivamente erogate dai singoli elementi in cui si è stato suddiviso il dispersore.

Note le correnti parziali effettive si può determinare successivamente il potenziale in un qualunque punto del terreno applicando ancora il principio di sovrapposizione degli effetti.

In particolare, assegnata una direzione sulla superficie del terreno può essere determinato l'andamento del potenziale lungo quella direzione, allo scopo di individuare i valori massimi della tensione di contatto e della tensione di passo.

2.4 COMPORTAMENTO DEI DISPERSORI MAGLIATI

L'obiettivo principale del progetto di un impianto di terra è quello di determinare le caratteristiche geometriche del sistema disperdente, in grado di disperdere la massima corrente di guasto a terra

prevista con il minor numero possibile di elementi, per evidenti ragioni economiche, senza che vengano superati i valori massimi consentiti per le tensioni di contatto e di passo.

A tal fine, i parametri principali da prendere in considerazione nella scelta della configurazione di un dispersore magliato sono il perimetro del dispersore e la lunghezza del lato elementare di maglia.

La profondità di interramento della maglia in genere non si discosta molto dai valori di 0,5÷0,6 m; profondità di interramento più elevate comporterebbero costi di messa in opera maggiori, mentre una profondità minima è richiesta al fine di limitare le sollecitazioni meccaniche sugli elementi del dispersore nonché gli effetti delle variazioni stagionali della resistività superficiale del terreno.

La sezione dei conduttori va scelta seguendo le indicazioni delle norme, in relazione alle sollecitazioni termiche e al fenomeno della corrosione; d'altra parte, nel campo dei valori realistici che essa può assumere, essa risulta ininfluente sulle prestazioni del dispersore.

Per quanto concerne l'estensione minima del dispersore è buona norma fare in modo che tutte le apparecchiature da mettere a terra siano contenute all'interno del suo perimetro. In tali condizioni le tensioni di contatto da prendere in considerazione sono soltanto quelle interne all'area occupata dal dispersore, con i vantaggi di seguito indicati.

Per valutare l'influenza del lato elementare di maglia sulle prestazioni del dispersore, in termini di tensioni pericolose, è opportuno innanzi tutto studiare la distribuzione del potenziale sulla superficie del terreno. Si consideri la rete magliata di fig. 4, realizzata con conduttori di sezione 60 mm^2, L = 40 m e lato elementare di maglia ℓ = 10 m.

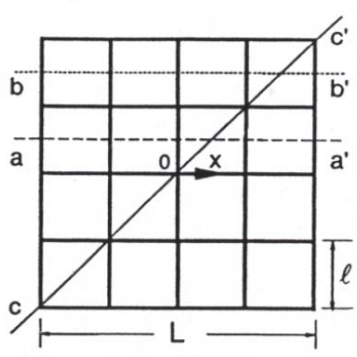


Fig. 2.4

In Fig. 5 sono riportati in funzione di x gli andamenti assunti dal potenziale sulla superficie del terreno lungo le due mediane di maglia (direzioni a-a' e b-b' di Fig. 2.4) e lungo la diagonale (direzione c-c'), valutati al calcolatore applicando la metodologia di calcolo esposta al paragrafo precedente, nell'ipotesi che il dispersore sia interrato ad una profondità di 0,5 m in un terreno omogeneo di resistività ρ = 100 Ωm e disperda una corrente I_F = 500 A. Come si può vedere, all'interno dell'area del dispersore e lungo le tre direzioni considerate, il potenziale sulla superficie del terreno oscilla tra valori di picco e valori di minimo; i primi si manifestano in corrispondenza dei conduttori sottostanti, mentre i secondi nelle zone interne di ciascuna maglia. In corrispondenza dei valori di minimo, e in particolare in corrispondenza delle maglie periferiche, la tensione di contatto assume i valori più elevati. All'esterno, il potenziale decresce molto rapidamente e pertanto lì le tensioni di passo assumono i valori più elevati; per lo stesso motivo, anche le tensioni di contatto sono maggiori, tendendo ad assumere il valore della tensione totale di terra.

E' bene osservare come, rispetto alle altre direzioni, lungo la diagonale il potenziale sulla superficie del terreno presenta una disuniformità maggiore e quindi lungo tale direzione si verificano i valori massimi, sia della tensione di contatto interna ($U_{ST,max}$), che delle tensioni di passo all'interno e all'esterno del perimetro del dispersore.

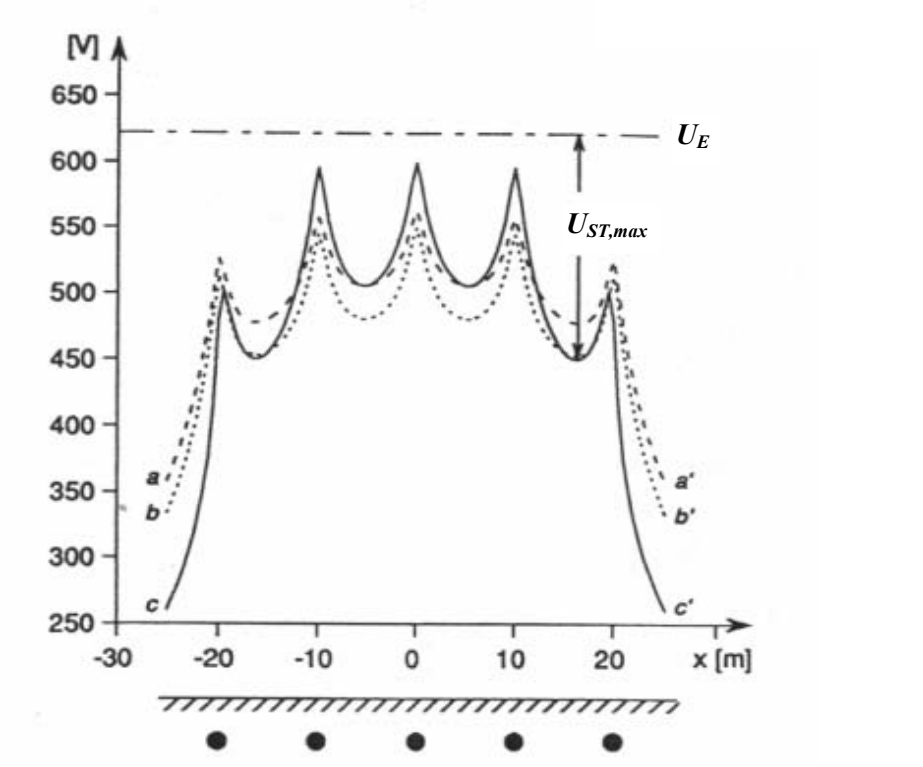


Fig. 2.5

Pertanto la direzione diagonale può essere considerata, in generale, la più significativa al fine di valutare le tensioni di contatto e di passo massime nei dispersori a rete magliata.

A pari perimetro della rete magliata, la distribuzione del potenziale sulla superficie del terreno risulta tanto più uniforme quanto più è fitta la magliatura interna, dando così luogo a valori più ridotti delle tensioni di contatto e di passo. La Fig. 2.6 riporta, per i tre modelli di dispersore ivi rappresentati, gli andamenti del potenziale sulla superficie del terreno (in percento della tensione totale di terra) lungo la direzione semi-diagonale in funzione della distanza d valutata a partire dal centro del dispersore. Si osserva che il dispersore più magliato (A3), presenta un andamento di potenziale molto più uniforme degli altri due, con valori percentuali più elevati; per cui sia le tensioni di contatto che le tensioni di passo risultano minori.

In particolare, assunto un dato valore limite (U_{Tp}) per le tensioni di contatto, ad esempio 70 V (per i tre modelli considerati, supposto approssimativamente pari al 20% della tensione totale di terra), affinché la tensione di contatto all'interno dell'area del dispersore non superi quel limite, occorre che il potenziale sulla superficie del terreno in ogni punto interno al perimetro del dispersore non sia inferiore all' 80 % della tensione totale U_E. Come si vede dalla Fig. 2.6, ciò si verifica soltanto nel caso del dispersore A3, per il quale l'andamento del potenziale è tutto contenuto al di sopra del limite inferiore rappresentato dalla retta orizzontale in tratteggio.

Le tensioni di passo, in generale, risultano più piccole di quelle di contatto e, come rilevato prima, assumono il valore massimo all'esterno, a circa 1 m dallo spigolo della rete magliata, dove l'andamento del potenziale presenta la massima pendenza.

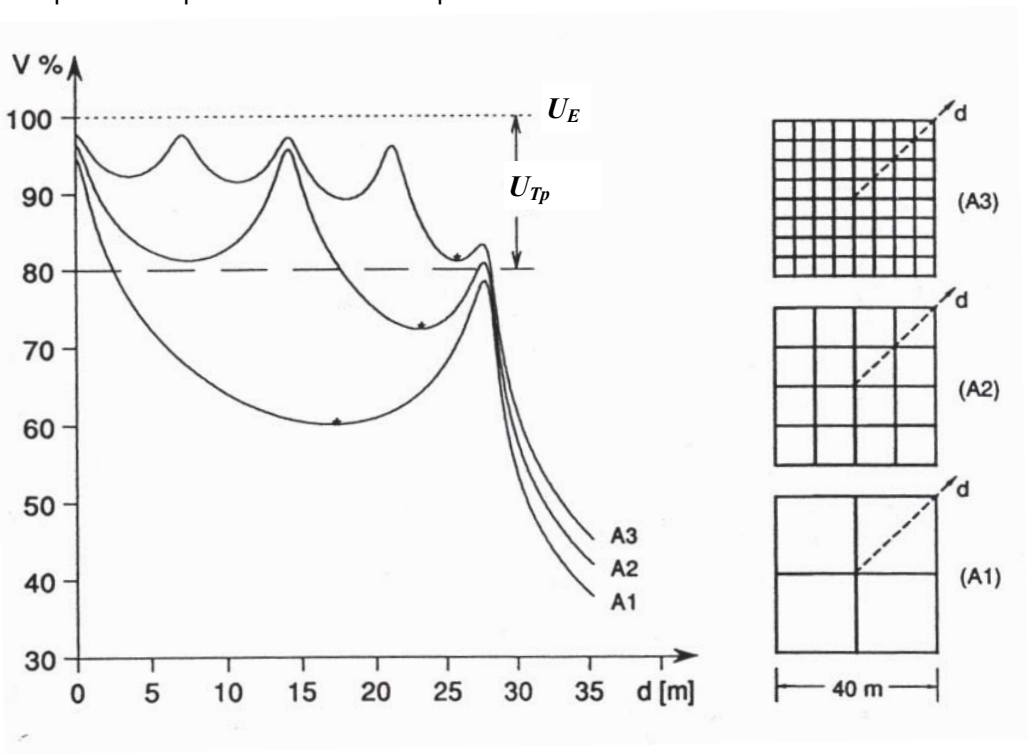


Fig. 2.6

Il dispersore più magliato presenta anche tensioni di passo più piccole; ciò è rilevabile dalla minore pendenza, rispetto agli altri casi, della curva di potenziale all'esterno del perimetro del dispersore. Nell'esempio considerato, il valore massimo della tensione di passo può essere valutato intorno al 12% della tensione totale.

Si osserva inoltre, come la tensione di contatto massima, nella direzione di esplorazione considerata, si ha nelle maglie d'angolo, in punti che risultano tanto più decentrati e vicini al bordo del dispersore quanto più fitta è la magliatura (punti marcati con un asterisco in figura). In corrispondenza delle maglie d'angolo si osserva infine una maggiore disuniformità del potenziale sulla superficie del terreno, per cui in corrispondenza di esse si hanno anche le tensioni di passo interne più elevate.

Quanto sopra si manifesta anche nelle altre maglie periferiche della rete, seppure in misura minore rispetto alle maglie d'angolo, qualunque sia la direzione di esplorazione del potenziale sul terreno considerata (vedi Fig. 2.5), e vale in generale per dispersori a maglie regolari.

2.5 PRESTAZIONI DEI DISPERSORI MAGLIATI

Le prestazioni di numerosi dispersori di diverse caratteristiche e dimensioni sono state analizzate mediante programma di calcolo, basato sul metodo teorico esposto al § 2.3 e che ha avuto anche numerosi riscontri sperimentali. Da questa analisi sono state ricavate espressioni analitiche interpolatrici che consentono di prevedere in fase di progetto, entro margini di errore accettabili, i valori delle grandezze elettriche più significative del dispersore che si deve realizzare. Tali espressioni

analitiche hanno consentito di elaborare, a scala logaritmica, gli abachi riportati nel seguito, validi per dispersori a maglie regolari interrati alla profondità di 0,5 m in terreno supposto omogeneo.

Negli abachi delle Figg. 2.7, 2.8 e 2.9, al variare del perimetro p del dispersore e per alcuni valori del lato elementare di maglia ℓ, sono riportati gli andamenti della resistenza di terra (R_E), della tensione di contatto massima nella maglia d'angolo ($U_{ST,max}$) e della tensione di passo massima esterna lungo la diagonale ($U_{SS,max}$), calcolate per ρ = 1 Ω.m e I_F = 100 A. Tali grandezze possono considerarsi quelle maggiormente significative per scelta della configurazione ottimale di un dispersore magliato. Per una migliore lettura del grafico, nella fig. 7 sono state omesse alcune caratteristiche.

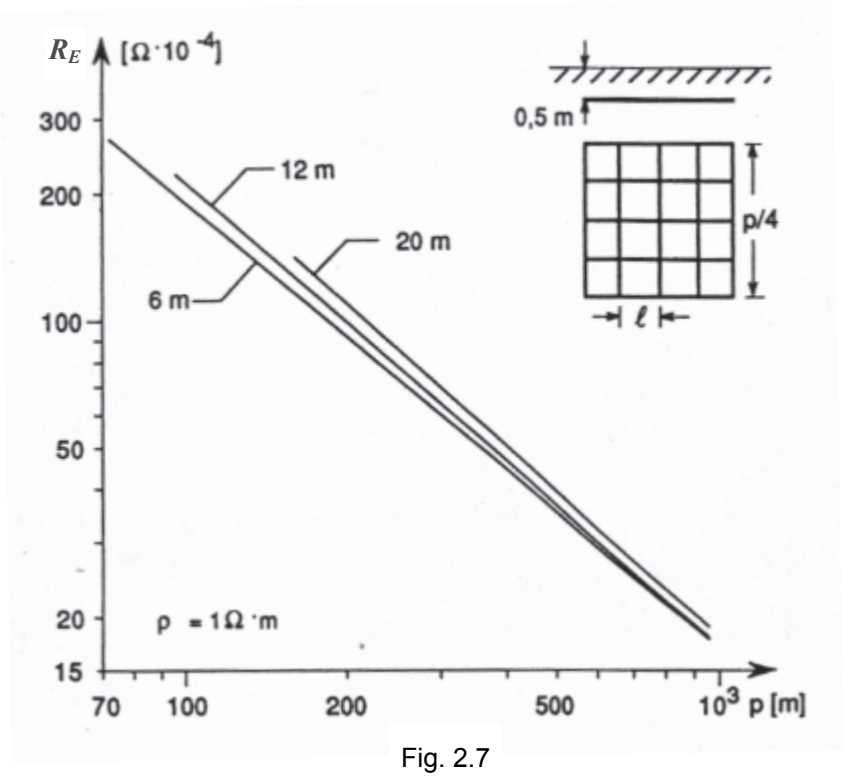


Fig. 2.7

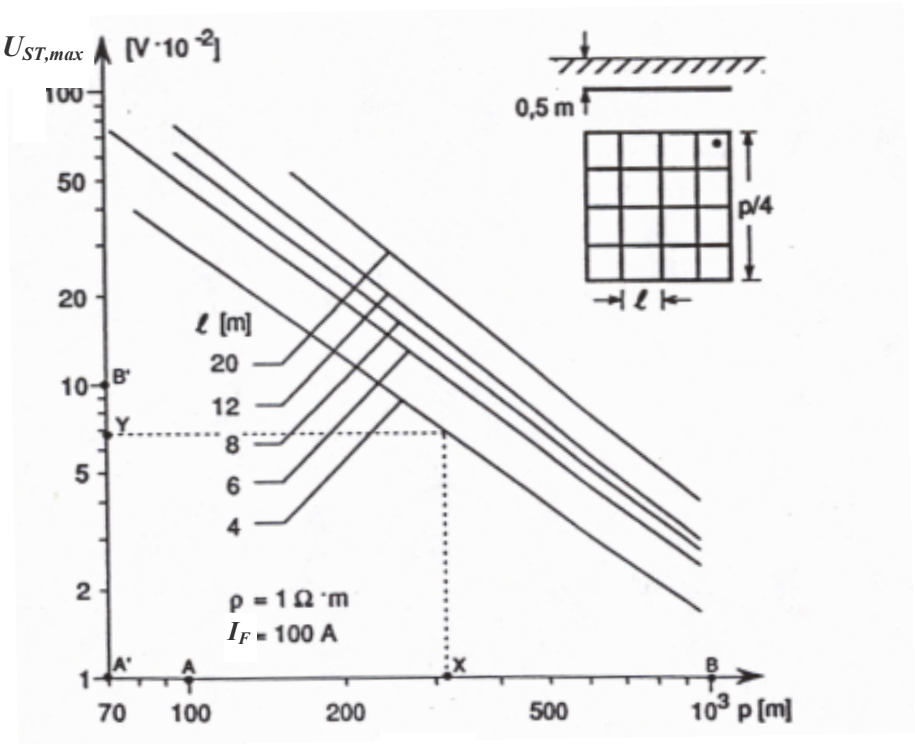


Fig. 2.8

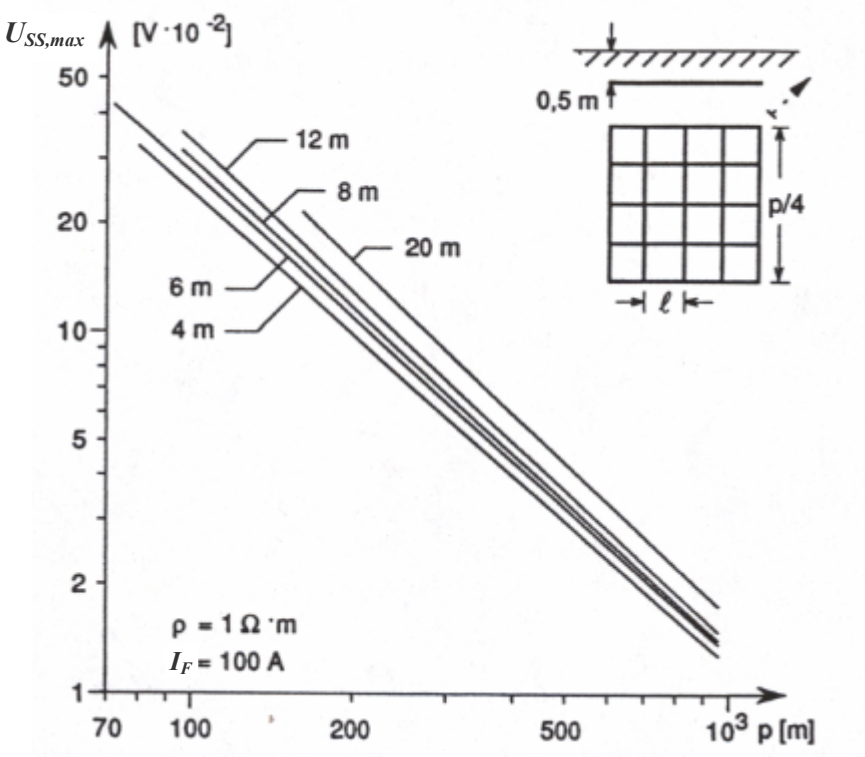


Fig. 2.9

Dagli abachi sopra riportati risulta evidente come, a pari perimetro, diminuendo il lato elementare ℓ di maglia diminuisce soprattutto il valore massimo delle tensioni di contatto $U_{ST,max}$ (Fig. 2.8), mentre sia il valore della resistenza di terra R_E che il valore massimo delle tensioni di passo di $U_{SS,max}$ diminuiscono in misura molto più modesta (Figg. 2.7 e 2.9), tanto più modesta quanto più esteso è il dispersore.

2.5.1 Tensioni pericolose a vuoto ed effettive

I valori delle tensioni di contatto e di passo ricavati con la metodologia esposta al § 2.3 e riportati rispettivamente negli abachi di Figg. 2.8 e 2.9 non tengono conto, a favore della sicurezza, della presenza della persona nel campo di corrente creato dal dispersore nel terreno.

Si tratta dunque di tensioni di contatto e di passo "a vuoto", le quali risultano maggiori di quelle effettive (U_T e U_S) applicate alla persona e prese come riferimento per la sicurezza dalle norme. Le tensioni U_T e U_S sono quelle misurate in fase di verifica del dispersore (prima della messa in servizio dell'impianto) seguendo la procedura indicata dalle norme stesse. Tale procedura prevede l'utilizzo di un voltmetro avente resistenza interna 1000 Ω, convenzionalmente pari alla resistenza del corpo umano, e due piastre di misura, di date dimensioni poggiate sul terreno, che simulano i piedi della persona.

Lo scarto tra i valori delle tensioni pericolose "a vuoto" e quelle effettive dipende dalla resistività del terreno ed aumenta con essa. Per valori di resistività medio-bassi, ad esempio 50÷100 Ω.m, lo scarto tra valori a vuoto ed effettivi è piuttosto contenuto, dell'ordine del 10÷15% per le tensioni di contatto e 20÷30% per quelle di passo. Pertanto, nella scelta della configurazione ottimale del dispersore in fase di progetto si può fare riferimento, a favore della sicurezza e senza eccessivi sovradimensionamenti, ai valori assunti dalle tensioni pericolose a vuoto ricavati utilizzando gli abachi sopra descritti; gli scarti tra valori a vuoto e valori effettivi consentono, al tempo stesso, di compensare gli errori di interpolazione commessi nel ricavare gli abachi e di operare in fase di progetto con sufficienti margini cautelativi, in relazione anche a eventuali approssimazioni fatte nel valutare il valore della resistività del terreno mediante misure preliminari sul campo.

2.5.2 Utilizzazione degli abachi

Tenendo conto di quanto detto sopra, gli abachi di Figg. 2.8 e 2.9 possono essere direttamente utilizzati in fase di progetto del dispersore a maglie per un impianto di dato perimetro, al fine di individuare il lato elementare di maglia più idoneo a mantenere al di sotto di un prefissato valore le tensioni pericolose. I valori delle tensioni di contatto e di passo massime ricavati dagli abachi vanno riportati agli effettivi valori della resistività del terreno e della corrente di guasto prevista nell'impianto, come indicato nell'esempio di seguito riportato.

Si supponga che l'area su cui deve essere realizzato il dispersore abbia dimensioni in metri 80 x 80 e si disponga dei seguenti altri dati:

- resistività del terreno ρ = 75 Ωm;
- corrente di guasto a terra I_F = 2000 A;
- tempo di intervento delle protezioni t_F = 1 s.

Il modo di procedere è il seguente:

1) in relazione al tempo t_F, dalla curva di sicurezza tensione-tempo riportata nella Norma CEI 11-1 risulta che il valore limite imposto per le tensioni pericolose è U_{TP} = 103 V e U_{SP} = 3 U_{TP} = 309V;

2) individuata l'ascissa X corrispondente al perimetro p = 320 m nei diagrammi di Figg. 2.8 e 2.9, sulle caratteristiche relative a l = 4, 8 e 20 m (per i quali si ha un numero intero di maglie) si leggono i corrispondenti valori di $U^*_{ST,max}$ e $U^*_{SS,max}$ riportati in Tab. 2.1 ([2]);
3) i valori così ottenuti, divisi per i valori di ρ e I_F di riferimento degli abachi (1 e 100) e moltiplicati per i valori di ρ e I_F assegnati, forniscono le tensioni massime di contatto $U_{ST,max}$ e di passo $U_{SS,max}$, previste per il caso in esame con le diverse configurazioni di dispersore esaminate (v. tabella);
4) risulta in tal modo che il dispersore più idoneo in tal caso è quello avente lato di maglia ℓ = 4 m, per il quale sia la tensione di contatto che quella di passo si mantengono al di sotto dei valori limite fissati.

Dall'abaco di Fig. 2.7 è possibile, infine, stimare il valore della resistenza di terra del dispersore scelto, utilizzando in questo caso la caratteristica del dispersore che si avvicina di più a quello scelto, ossia quella relativa al dispersore con lato di maglia 6 m (la differenza tra i valori di resistenza di terra dei due dispersori risulta poco apprezzabile). Pertanto, effettuato il riporto a 75 Ωm del valore di R_E letto sul grafico di Fig. 2.7, si può assumere per essa il valore 0,28 Ω.

ℓ [m]	$U^*_{ST,max}$ [V]	$U^*_{SS,max}$ [V]	$U_{ST,max}$ [V]	$U_{SS,max}$ [V]
4	0,068	0,052	102	78
8	0,119	0,062	178	93
20	0,193	0,080	289	120

Tab. 2.1

2.5.3 Dispersori a maglie differenziate

Con riferimento all'esempio riportato al paragrafo precedente, è possibile ipotizzare anche soluzioni diverse, nonché più economiche, di quella prima ottenuta. Si è osservato in precedenza come in un dispersore a maglie uniformi i valori più elevati delle tensioni di contatto si verificano nelle zone periferiche in corrispondenza dell'ultima fila di maglie, mentre nelle zone più interne si hanno valori notevolmente più piccoli. Per limitare le tensioni di contatto nelle zone periferiche si può realizzare una magliatura differenziata, più fitta nelle zone periferiche e meno fitta all'interno, allo scopo di uniformare maggiormente il potenziale sulla superficie del terreno.

([2]) Con riferimento alla Fig. 2.8, indicata con $\overline{AB}$ la lunghezza in cm di una decade sull'asse delle ascisse (in figura: A = 100, B = 10^3), il punto X = 320 (m) è individuato dal segmento $\overline{AX}$ (in cm) valutato come:

$$\overline{AX} = \overline{AB}\log_{10}\left(\frac{X}{A}\right) = \overline{AB}\log_{10}\left(\frac{320}{100}\right)$$

Indicata con $\overline{A'B'}$ la lunghezza in cm di una decade sull'asse delle ordinate (in figura: A' = 1, B' = 10), il valore corrispondente al punto Y (in Volt x 10^{-2}) relativo a una caratteristica sarà dato da:

$$Y = A' \cdot 10^{\left(\frac{\overline{A'Y}}{\overline{A'B'}}\right)}$$

Si riprenda, ad esempio, la situazione di Fig. 2.6 esaminata al § 2.6, considerando un ulteriore dispersore (B), il quale rappresenta una via di mezzo tra il modello (A2) a maglie larghe e quello (A3) a maglie più fitte (Fig. 2.10). Dall'andamento del potenziale sulla superficie del terreno si vede che anche con il dispersore B, per il quale i costi risultano certamente più contenuti rispetto ad A3, le tensioni di contatto all'interno dell'area del dispersore si mantengono al di sotto del limite U_{Tp}. In particolare, si osserva che per i due modelli A3 e B l'andamento del potenziale in corrispondenza

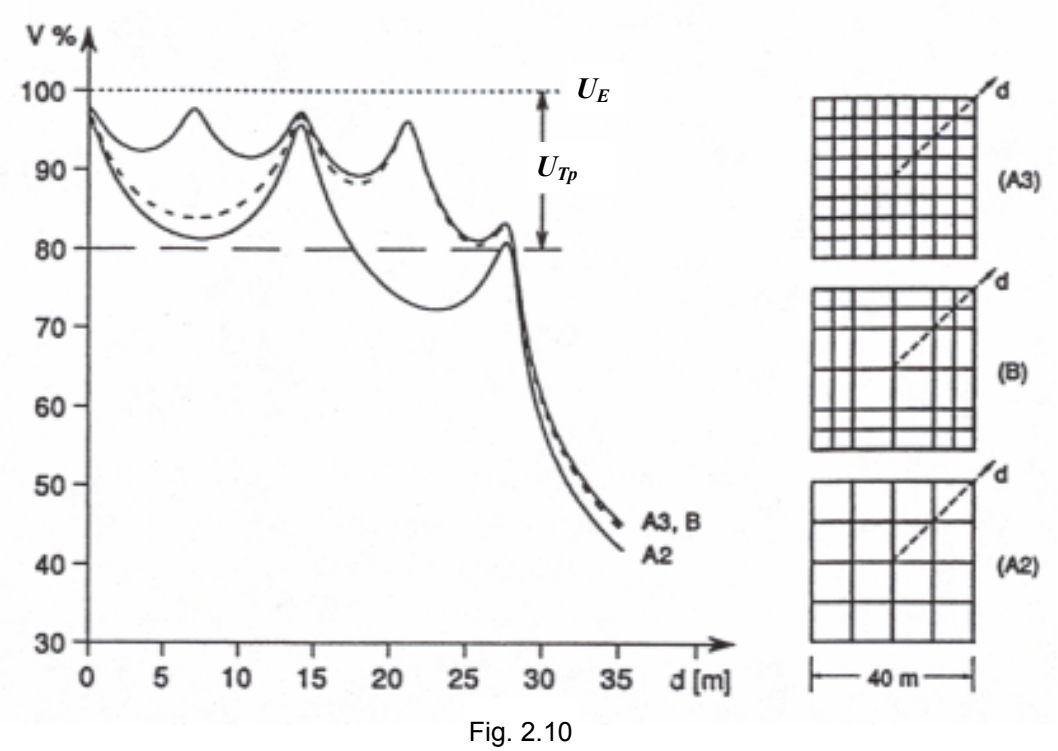


Fig. 2.10

della maglia d'angolo e all'esterno del perimetro risultano praticamente identici; ciò significa che passando dal modello A3 al modello B le tensioni di contatto e di passo massime $U_{ST,max}$ e $U_{SS,max}$ si possono considerare invariate. Per l'esempio riportato al paragrafo precedente si può allora utilizzare come soluzione alternativa il dispersore di Fig. 2.11 a maglie differenziate.

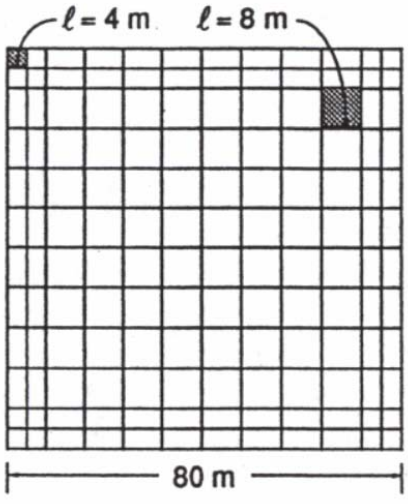


Fig. 2.11

Tenendo conto di quanto precedentemente osservato, per la valutazione della tensione di contatto massima nelle maglie d'angolo e di quella di passo esterna in una rete siffatta si possono ancora utilizzare, con buona approssimazione, gli abachi di Figg. 2.8 e 2.9, rispettivamente, considerando il dispersore come se fosse a maglie uniformi con lato elementare di maglia 4 m.

Occorre però verificare anche le tensioni di contatto nelle zone interne del dispersore, a maglie più larghe. Per tale verifica può essere utilizzato l'abaco di Fig. 2.12, che riporta i valori della tensione di contatto massima ($U'_{ST,max}$) nella maglia d'angolo della penultima fila.

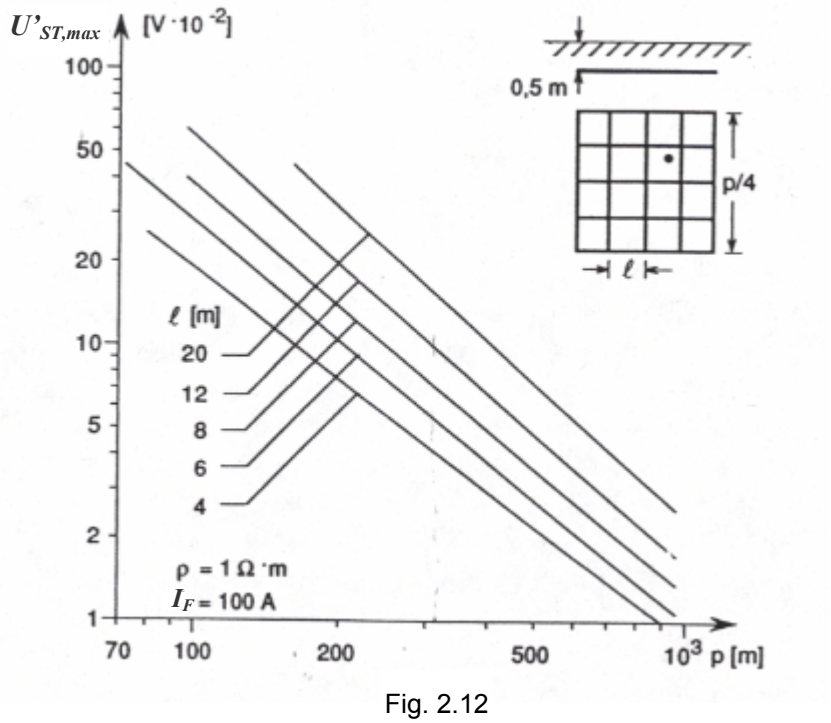


Fig. 2.12

In tal caso, considerando il dispersore come se fosse a maglie uniformi con lato elementare di maglia 8 m, facendo i necessari riporti, si ricava $U'_{ST,max}$ = 102,5 V, inferiore al limite imposto. Pertanto, per l'esempio prima considerato, può essere adottata la soluzione di Fig. 2.11 che presenta certamente costi notevolmente più bassi.

Infine, un'altra soluzione ipotizzabile per lo stesso esempio potrebbe essere quella, laddove possibile, di fare in modo che le masse delle apparecchiature da mettere a terra siano tutte contenute entro la penultima fila di maglie del dispersore. Ciò consentirebbe di realizzare tutto il dispersore con lato elementare di maglia 8 m, per il quale anche la tensione di passo massima rientra nel limite imposto (Tab. 2.1).

2.6 DISPERSORI A MAGLIE CON PICCHETTI

Nella realizzazione di un dispersore a maglie l'uso di elementi disperdenti verticali (chiamati picchetti), al fine di ridurre le tensioni di contatto e di passo al di sotto dei limiti di sicurezza, in genere può essere di grande utilità nel caso di terreno di resistività superficiale medio-alta; può diventare invece indispensabile nel caso in cui l'area a disposizione per la realizzazione della maglia di terra è modesta a fronte di un valore elevato della corrente di guasto a terra e di un terreno altamente resistivo. In tal caso, è necessario impiegare picchetti di notevole lunghezza (anche di qualche decina di metri),

opportunamente posizionati, al fine di raggiungere valori di tensioni di contatto e di passo accettabili. Con l'aggiunta di elementi disperdenti profondi, in molti casi si ha il vantaggio di raggiungere zone di terreno a più bassa resistività rispetto alla superficie (argille, falde acquifere, ecc...), migliorando in tal modo di molto le prestazioni del dispersore.

Un dispersore a maglie con picchetti può essere visto come un insieme di elementi disperdenti posti nel terreno in posizione orizzontale e verticale i quali, pur essendo in genere tutti allo stesso potenziale, contribuiscono in misura diversa a disperdere la corrente di guasto a terra in dipendenza della posizione che ciascun elemento occupa rispetto agli altri e rispetto alla superficie del terreno. La corrente di guasto a terra che interessa il dispersore, infatti, si ripartisce in modo non uniforme tra i diversi elementi che lo compongono, essendo diversa l'efficacia di ciascuno di essi, e ciò influisce sulle prestazioni complessive del dispersore stesso. Inoltre, la corrente che interessa ciascun elemento del dispersore (corda orizzontale o picchetto) non si ripartisce in modo uniforme, ma a causa di un "effetto di estremità", tende a interessare maggiormente le parti più estreme e profonde di esso.

Il costo in opera di un picchetto è in genere molto più elevato di quello di un elemento orizzontale di pari efficacia; occorre dunque stabilire la giusta collocazione, lunghezza e mutua distanza dei picchetti affinchè la loro efficacia sia massima, ottenendo in tal modo il massimo beneficio al minimo costo.

A chiarimento di quanto sopra affermato si consideri un dispersore a maglie uniformi di dimensioni 60x60 (mxm), lato elementare di maglia 12 m, con picchetti di lunghezza 12 m e diametro 40 mm disposti ai bordi e al centro come riportato schematicamente in Fig. 2.13. Supponendo che il dispersore sia posto in un terreno omogeneo di resistività 25 Ωm a 0,5 m di profondità e che disperda una corrente di 2.000 A, nella stessa figura sono riportati i valori di corrente dispersa da ciascuna

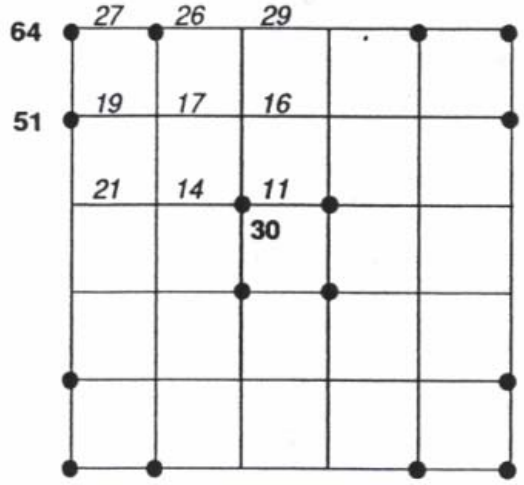


Fig. 2.13

parte degli elementi orizzontali che formano la maglia e dai picchetti (ad elementi disperdenti simmetrici corrispondono stessi valori di corrente).

Si può osservare subito come gli elementi periferici del dispersore, sia orizzontali che verticali, disperdono una corrente notevolmente maggiore di quella degli elementi più interni. Il motivo di ciò è che ciascun elemento è fortemente influenzato dalla presenza degli altri, soprattutto di quelli più vicini,

trovandosi all'interno del campo di potenziale del terreno generato da questi e dalle rispettive immagini rispetto alla superficie del terreno; in particolare, gli elementi periferici si trovano in punti del terreno dove il potenziale indotto da parte degli altri elementi disperdenti (reali e immagini) è più basso e pertanto erogano una corrente maggiore. Inoltre, si vede che, a pari lunghezza, il contributo alla dispersione della corrente da parte degli elementi verticali è più del doppio di quello degli elementi orizzontali. Infatti, a sua volta ogni elemento si può pensare costituito da tante parti elementari, ciascuna delle quali disperde una corrente diversa. Le parti più profonde degli elementi verticali, per lo stesso motivo detto prima, si trovano dunque in una condizione di potenziale del terreno circostante più favorevole alla dispersione della corrente e quindi la corrente da loro dispersa è notevolmente maggiore rispetto a quella delle parti poste più in superficie.

Gli elementi disperdenti orizzontali che formano la maglia di terra sono comunque indispensabili. La loro funzione è infatti quella di realizzare una elevata equipotenzialità del terreno su tutta l'area dell'impianto; la rete di terra, con opportuna magliatura, va quindi estesa a tutta l'area dell'impianto dove possono essere presenti masse e masse estranee. Piuttosto, per quanto prima detto, può essere conveniente realizzare la rete con una magliatura più fitta lungo la periferia (v. anche paragrafo precedente).

In linea di principio l'impiego dei picchetti in una maglia di terra non è indispensabile, eccetto che per i motivi prima detti. Se però utilizzati, in quanto necessari, è importante che essi siano bene posizionati al fine di raggiungere lo scopo prefissato, che è quello di ridurre le tensioni pericolose, con il minore costo. Il contributo alla dispersione della corrente a terra da parte dei picchetti può essere notevole se essi sono posti lungo la periferia della maglia e opportunamente distanziati. In particolare, si può notare come nell'esempio prima considerato i soli picchetti posti ai bordi disperdono circa il 40% della corrente totale, mentre quelli disposti al centro soltanto il 6%. L'utilità dei primi e l'inefficienza dei secondi può essere ancora meglio dimostrato osservando come si modifica l'andamento del potenziale sul terreno del solo dispersore a maglia di Fig. 2.13 con l'aggiunta dei picchetti.

In Fig. 2.14 sono riportati, per i tre modelli di dispersore ivi rappresentati, gli andamenti del potenziale sulla superficie del terreno (in percento della tensione totale di terra) in funzione della distanza d valutata a partire dal centro del dispersore e muovendosi lungo la direzione semi-diagonale.

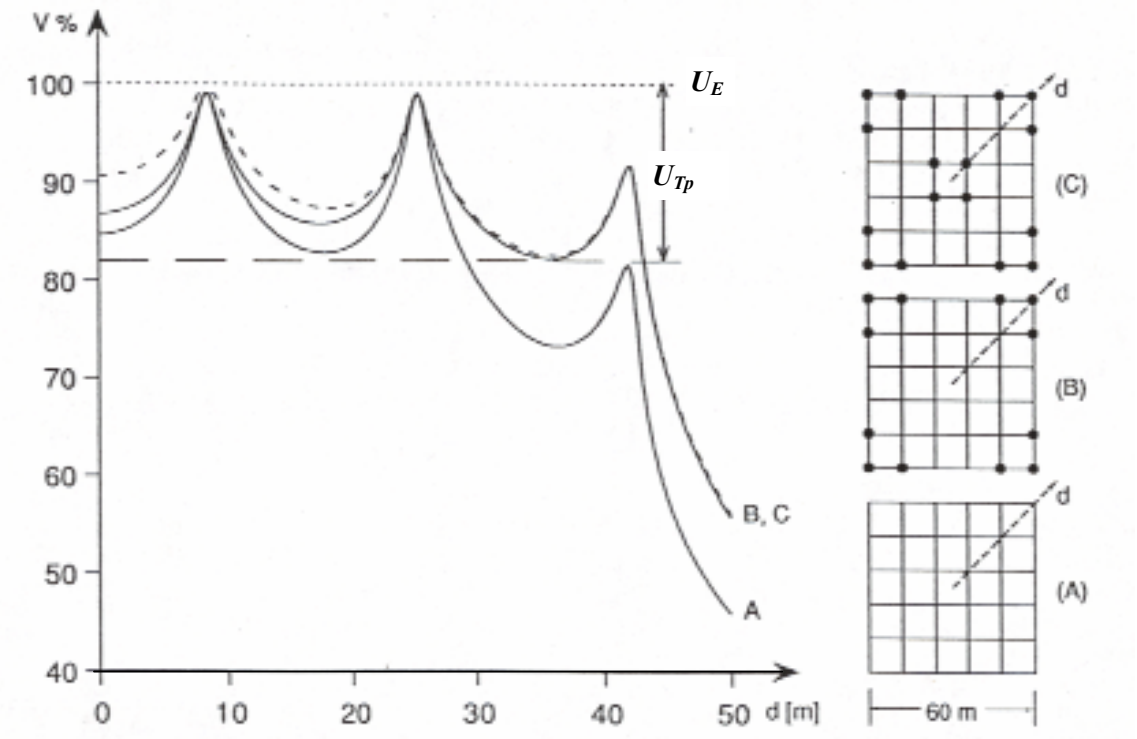


Fig. 2.14

Ragionando in modo analogo a quanto fatto ai paragrafi precedenti, assunto per le tensioni di contatto il valore limite U_{Tp} = 70 V (che per i tre modelli di figura grossomodo si può assimilare pari a il 18% della U_E), affinché la tensione di contatto all'interno dell'area del dispersore non superi tale limite, occorre che il potenziale sulla superficie del terreno in ogni punto interno al perimetro della maglia abbia valore non inferiore all' 82 % della U_E. Come si vede, ciò si verifica aggiungendo nella maglia i soli picchetti posizionati ai bordi di essa (modello B), essendo in tal caso l'andamento del potenziale sulla superficie del terreno tutto contenuto al di sopra del limite inferiore rappresentato dalla retta orizzontale in tratteggio. Invece, i picchetti aggiunti al centro della maglia (modello C), che producono l'andamento riportato in figura in tratteggio, risultano del tutto inutili, in quanto essi producono soltanto una riduzione delle tensioni di contatto nelle maglie interne del dispersore (già inferiori a $U_{ST,x}$ con il modello A); mentre sono ininfluenti sulla la riduzione della tensione di contatto massima nelle maglie d'angolo. Per quanto riguarda invece le tensioni di passo, passando dal modello A al modello B si osserva una minore pendenza dell'andamento del potenziale sulla superficie del terreno, soprattutto all'esterno dell'area del dispersore dove si hanno le tensioni di passo più elevate. Anche per quanto riguarda la riduzione delle tensioni di passo pericolose la presenza dei picchetti al centro invece è ininfluente.

2.6.1 Scelta e posizionamento dei picchetti

Da quanto osservato sopra deriva che nell'impiego di elementi disperdenti a picchetto in un dispersore di terra complesso è necessario seguire alcune regole di carattere generale al fine di aumentare l'efficacia di tali elementi, in relazione anche agli elevati costi in opera che essi comportano.

Nell'impiego nei dispersori a maglie, una prima regola da seguire è quella di disporre i picchetti nelle zone periferiche del dispersore e in particolare in corrispondenza delle maglie d'angolo.
Occorre inoltre distanziare opportunamente i picchetti in relazione alla loro lunghezza; maggiore è la distanza tra i picchetti, minore è l'influenza che ciascuno di essi subisce da parte degli altri. Ai fini pratici, in generale, una seconda regola da seguire può essere quella di porre tra loro i picchetti ad una distanza almeno pari alla loro lunghezza.
Infine, la lunghezza dei picchetti deve essere sufficiente affinché essi non sentano fortemente l'influenza degli elementi orizzontali del dispersore a maglie e sia resa vana la loro presenza; negli esempi riportati nelle Figg. 2.13 e 2.14, ad esempio, adottando picchetti di lunghezza modesta (1÷2 m) in relazione alle dimensioni della maglia, si otterrebbero dei risultati del tutto trascurabili. Terza regola da seguire, allora, può essere quella di utilizzare picchetti di lunghezza non inferiore al lato elementare di maglia e tanto più lunghi quanto più estesa è la maglia.

2.6.2 Prestazioni dei dispersori a maglie con picchetti

Sintetizzando le prestazioni di numerosi dispersori a maglie regolari con picchetti, realizzati con i criteri suddetti e interrati alla profondità di 0,5 m in terreno supposto omogeneo, sono stati ricavati, con le stesse modalità indicate al § 2.5, degli abachi che possono essere utilizzati in fase di progetto per la scelta e il dimensionamento di tali dispersori.
Nelle Figg. 2.15, 2.16, e 2.17, al variare del perimetro (p) del dispersore e per alcuni valori del lato elementare di maglia (ℓ) e della lunghezza dei picchetti (ℓ_p), sono riportati gli andamenti, rispettivamente, della resistenza di terra (R_E), della tensione di contatto massima nella maglia d'angolo dell'ultima file di maglie ($U_{ST,max}$) e della tensione di passo massima esterna ($U_{SS,max}$), calcolate per ρ = 1 Ωm e I_F = 100 A. Per i dispersori con maglie elementari di 4 m, a scopo di confronto, sono riportate (in tratteggio) anche le caratteristiche relative alle stesse grandezze in assenza di picchetti.
Sono stati presi in considerazione dispersori a maglie quadrate con perimetro compreso tra 80 e 1.000 m, maglie elementari di 4, 8, 12, 20 m e picchetti di lunghezza 8, 12, 20 m. I picchetti, per un massimo di 12, si considerano disposti in corrispondenza delle maglie d'angolo (v. Fig. 2.13) e in modo che la distanza tra essi sia non inferiore alla loro lunghezza; laddove, in relazione alle dimensioni del dispersore, ciò non è realizzabile sono considerati soltanto i 4 picchetti disposti in corrispondenza degli spigoli.
Gli elementi orizzontali del dispersore sono supposti realizzati con corda nuda di diametro 63 mm^2, mentre quelli verticali con elementi tubolari del diametro di 40 mm; nell'ambito delle dimensioni commerciali più comuni, valori diversi di tali parametri hanno un'influenza del tutto trascurabile sulle prestazioni del dispersore.

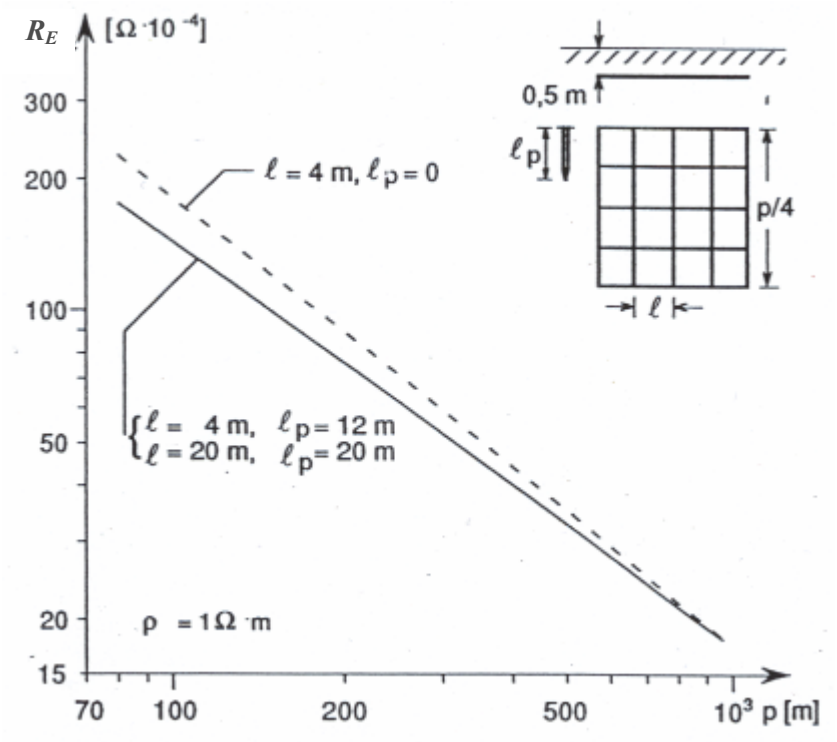


Fig. 2.15

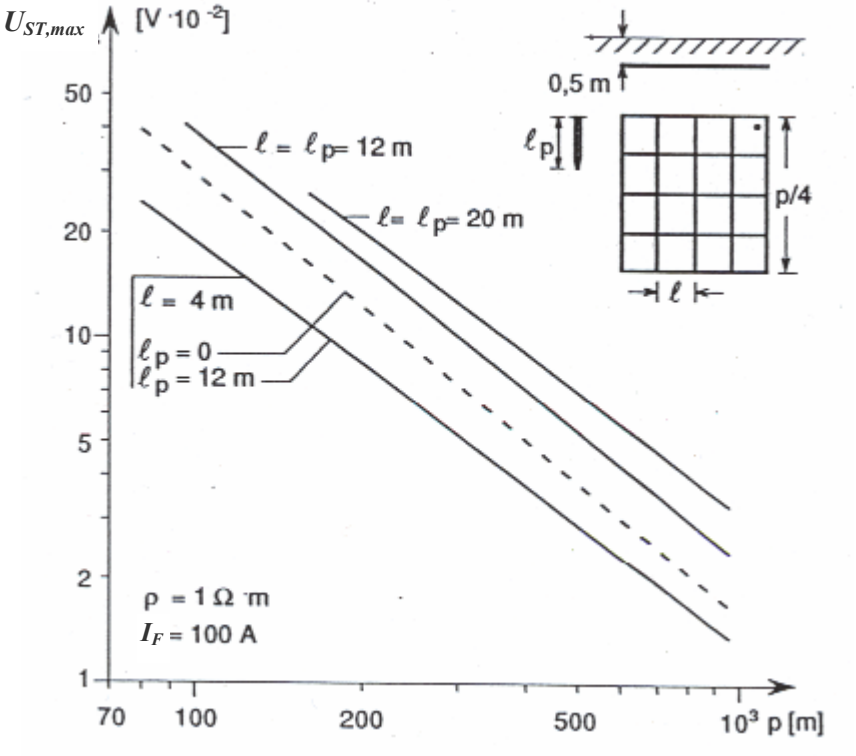


Fig. 2.16

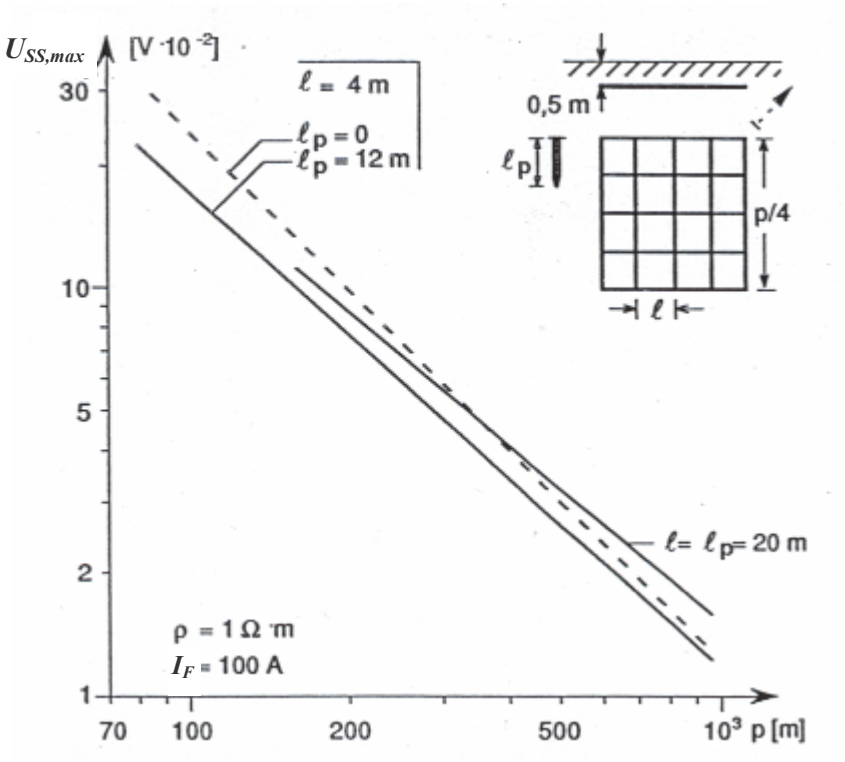


Fig. 2.17

Con riferimento alla Fig. 2.15 occorre osservare che, per dispersori a maglie con lato elementare di maglia 4 m, picchetti di lunghezza compresa tra 8 e 20 m determinerebbero, rispetto ai valori indicati dal grafico, variazioni compresi tra ±5,5%. Inoltre, con buona approssimazione, si possono assumere gli stessi valori ricavati dal grafico anche per dispersori con lato elementare di maglia compreso tra 4 e 20 m e picchetti di lunghezza 12 m. Infine, si osserva come al crescere delle dimensioni del dispersore la riduzione della resistenza di terra ottenuta con l'impiego dei picchetti diventa sempre più piccola e diventa poco apprezzabile per dispersori molto estesi.

Rispetto ai valori riportati negli abachi, per dispersori a maglie con lato elementare di maglia 4 m, picchetti di lunghezza compresa tra 8 e 20 m determinerebbero variazioni comprese tra ±5,5% sulla resistenza totale di terra e non superiori al 10% sulle tensioni di contatto e di passo.

2.7 CONCLUSIONI

Nella fase di progetto dell'impianto di messa a terra in impianto in alta tensione, scelta una data configurazione per il dispersore e note le caratteristiche elettriche del terreno ospitante, è necessario prevedere in modo sufficientemente approssimato le tensioni di contatto e di passo che possono originarsi nell'impianto a seguito di un guasto monofase a terra. Tali tensioni non devono superare in nessun punto, sia all'interno che all'esterno dell'impianto, il valore limite (U_{TP}) fissato dalle norme in relazione al tempo di interruzione del guasto da parte del dispositivo di protezione posto a monte della linea che alimenta l'impianto.

Una attenta valutazione delle prestazioni del dispersore condotta in fase di progetto e prima della sua messa in opera, consente di evitare, in fase di verifica dell'impianto, la necessità di dovere apportare sostanziali modifiche alla configurazione del dispersore che, oltre a presentare spesso notevoli

difficoltà pratiche, comportano indubbiamente costi molto elevati. A tale scopo si deve ritenere preliminare alla progettazione una campagna di misure idonea a fornire le necessarie informazioni sulla conformazione del terreno e sulla sua resistività.

Utilizzando gli abachi qui presentati, che mettono in relazione le caratteristiche elettriche e geometriche del dispersore e del terreno ospitante, il progettista può scegliere con buona approssimazione la configurazione ottimale del dispersore che soddisfa le condizioni imposte dalle norme.

A volte nella scelta della configurazione del dispersore sono possibili più soluzioni; ad esempio, con maglie uniformi o differenziate, con o senza picchetti. In tal caso, al progettista spetta anche il compito di scegliere la soluzione più conveniente sia dal punto di vista economico che dal punto di vista tecnico.

CAPITOLO 3

INTERFERENZA CONDUTTIVA TRA ELETTRODI INTERRATI E POTENZIALI TRAFERITI SU STRUTTURE INERTE

3.1 INTRODUZIONE

Nel caso di un guasto a terra in un impianto elettrico in alta tensione dotato di un proprio dispersore (elettrodo attivo), la presenza di altri dispersori e, in generale, di altri corpi metallici interrati nell'area di influenza del primo e non collegati metallicamente a esso (elettrodi inerti) dà luogo ad una serie di fenomeni che possono essere inquadrati come interferenza conduttiva, giacché, in una rappresentazione circuitale equivalente, di essi si può tenere conto in modo completo a mezzo di soli parametri resistivi.

Tali fenomeni possono determinare, localmente o a distanza, situazioni di pericolo per l'uomo oppure possono danneggiare le apparecchiature elettriche, sicché in fase di progetto del dispersore di terra di una installazione elettrica in alta tensione è necessario tenerne conto. In particolare, i corpi metallici inerti che ricadono nell'area di influenza del dispersore interessato dal guasto a terra possono assumere potenziali pericolosi, i quali possono essere trasferiti all'esterno del terreno dando luogo a tensioni di contatto e di passo pericolose, localmente e a distanza. Si pensi, ad esempio, a tubazioni e recinzioni metalliche aliene, non appartenenti cioè all'impianto interessato dal guasto, poste nelle vicinanze, oppure al dispersore di terra di un'altra installazione confinante con l'impianto disperdente. Inoltre, gli stessi corpi metallici possono raccogliere e convogliare parte della corrente di terra, per restituirla poi in zone lontane, a potenziale più basso, stabilendo localmente sulla superficie del terreno elevati gradienti di potenziali e tensioni pericolose.

Altri aspetti rilevanti dell'interferenza conduttiva riguardano:

- la variazione della distribuzione della corrente di guasto tra le diverse parti dell'elettrodo attivo rispetto a quella che si avrebbe in assenza degli elettrodi inerti. In particolare, si ha un maggiore addensamento della corrente verso le parti che si affacciano verso questi ultimi;
- la deformazione del campo di corrente nel terreno (come conseguenza del punto precedente) e dell'andamento del potenziale sulla superficie del terreno, soprattutto nelle zone prossime ai contorni degli elettrodi inerti dove si dove si possono manifestare gradienti di potenziali elevati.

Infine, altra conseguenza della presenza di elettrodi inerti interrati nelle vicinanze di un dispersore, anche se di entità e importanza modesta, è la riduzione della sua resistenza di terra e, quindi, della tensione totale.

L'entità dei fenomeni suddetti dipende da diversi fattori, quali dimensioni, forma e posizioni relative dell'elettrodo disperdente e degli elettrodi inerti, nonché grado di omogeneità del terreno. In particolare, nel caso di terreno non omogeneo, la presenza di uno strato inferiore di terreno di maggiore resistività, rispetto a quello superficiale, aumenta il grado di accoppiamento tra elettrodo attivo ed elettrodi inerti; ciò in quanto la corrente dispersa dall'elettrodo attivo tende ad interessare maggiormente lo strato di terreno più conduttivo superficiale, in cui sono allocati gli elettrodi, per cui i fenomeni dovuti all'interferenza conduttiva tendono ad esaltarsi maggiormente.

3.2 METODOLOGIA GENERALE DI CALCOLO

I problemi connessi con l'interferenza conduttiva tra elettrodi interrati possono essere affrontati utilizzando una metodologia di calcolo di validità generale, che fa ricorso al metodo delle sorgenti equivalenti per la simulazione delle strutture interrate e lo studio del campo di potenziale nel terreno e che impiega idonee relazioni ausiliarie per tenere conto di ulteriori vincoli circuitali tra le grandezze elettriche che interessano gli elettrodi.

Si considerino due elettrodi qualsiasi interrati, di cui uno (A) chiamato a disperdere una data corrente I_F e l'altro (B) posto nell'area di influenza del primo e non metallicamente collegato ad esso, come rappresentato schematicamente in Fig. 3.1.

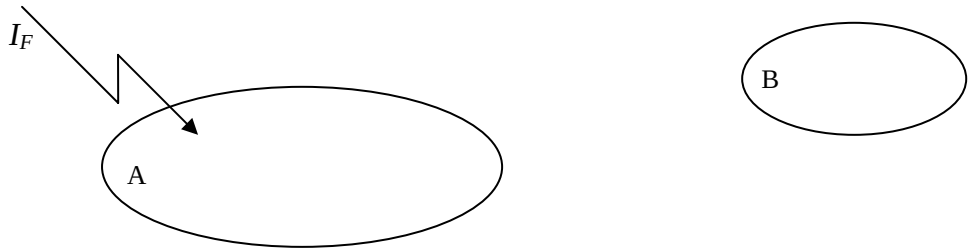


Fig. 3.1

L'elettrodo A può essere il dispersore magliato di una stazione elettrica chiamato a disperdere la corrente di guasto a terra in stazione (dispersore attivo); mentre l'elettrodo B può rappresentare il dispersore di una installazione elettrica confinante (dispersore passivo), oppure una qualsiasi struttura metallica posta nelle vicinanze, in contatto con il terreno, e non collegata metallicamente al dispersore attivo (recinzione, tubazione, binario ferroviario, guaina di un cavo, ecc.).

Ciascun elettrodo può essere opportunamente rappresentato da un insieme di conduttori cilindrici rettilinei di diametro molto piccolo rispetto alla lunghezza. Ragionando in modo analogo a quanto fatto per lo studio dei dispersori complessi, si può allora applicare il metodo delle sottoaree di Maxwell; si suddividono i due elettrodi in tante parti elementari in modo da potere supporre che ciascuna di esse scambi corrente con il terreno con densità assiale costante ma di intensità diversa, in generale, rispetto alle altre parti.

Ricorrendo al metodo delle sorgenti equivalenti e applicando il principio di sovrapposizione degli effetti, si può scrivere la seguente relazione matriciale compatta (*equazione di campo*):

$$[\boldsymbol{V}] = [\boldsymbol{R}] \cdot [\boldsymbol{I}] \tag{3.1}$$

in cui:

$\boldsymbol{V}$ è il vettore colonna dei potenziali assunti verso l'infinito dalle diverse parti di A e di B;

$\boldsymbol{R}$ è la matrice quadrata dei coefficienti di potenziale proprio e mutuo;

$\boldsymbol{I}$ è il vettore colonna delle correnti scambiate con il terreno dalle diverse parti di A e di B.

Partizionando i vettori $\boldsymbol{V}$ e $\boldsymbol{I}$ e la matrice $\boldsymbol{R}$ in modo da evidenziare le grandezze elettriche relative all'elettrodo A, supposto suddiviso in n parti, e quelle dell'elettrodo B, che si suppone suddiviso in m parti, si possono scrivere le seguenti altre relazioni matriciali:

$$\left[\boldsymbol{V}_A\right]=\left[\boldsymbol{R}_{nn}\right]\cdot\left[\boldsymbol{I}_A\right]+\left[\boldsymbol{R}_{nm}\right]\cdot\left[\boldsymbol{I}_B\right] \tag{3.2}$$

$$\left[\boldsymbol{V}_B\right]=\left[\boldsymbol{R}_{mn}\right]\cdot\left[\boldsymbol{I}_A\right]+\left[\boldsymbol{R}_{mm}\right]\cdot\left[\boldsymbol{I}_B\right] \tag{3.3}$$

dove i pedici delle submatrici di R indicano le rispettive dimensioni.

Partizionando allo stesso modo la matrice delle conduttanze $\boldsymbol{G}$, ottenuta dall'inversione della matrice $\boldsymbol{R}$, e adottando le stesse notazioni matriciali di (3.2) e (3.3), la (3.1) si possono anche scrivere a mezzo le seguenti espressioni:

$$\left[\boldsymbol{I}_A\right]=\left[\boldsymbol{G}_{nn}\right]\cdot\left[\boldsymbol{V}_A\right]+\left[\boldsymbol{G}_{nm}\right]\cdot\left[\boldsymbol{V}_B\right] \tag{3.4}$$

$$\left[\boldsymbol{I}_B\right]=\left[\boldsymbol{G}_{mn}\right]\cdot\left[\boldsymbol{V}_A\right]+\left[\boldsymbol{G}_{mm}\right]\cdot\left[\boldsymbol{V}_B\right] \tag{3.5}$$

le quali, esplicitate in termini di equazioni algebriche, danno luogo ad un sistema di n+m equazioni del tipo:

$$I_i^{(A)}=\sum_{j=1}^{n}G_{ij}\cdot V_j^{(A)}+\sum_{j=n+1}^{n+m}G_{ij}\cdot V_j^{(B)};\qquad i=1,2,\cdots,n \tag{3.6}$$

$$I_i^{(B)}=\sum_{j=1}^{n}G_{ij}\cdot V_j^{(A)}+\sum_{j=n+1}^{n+m}G_{ij}\cdot V_j^{(B)};\qquad i=n+1,\cdots,n+m \tag{3.7}$$

in cui le incognite sono rappresentate da n+m correnti e n+m potenziali.
A tali equazioni vanno aggiunte le *relazioni ausiliarie*, che descrivono le condizioni fisiche del sistema. In particolare, il bilancio delle correnti fornisce le seguenti due relazioni ausiliarie:

$$\sum_{i=1}^{n}I_i^{(A)}=I_F \tag{3.8}$$

$$\sum_{i=n+1}^{n+m}I_i^{(B)}=0 \tag{3.9}$$

Inoltre, assumendo l'ipotesi di equipotenzialità di ciascun elettrodo si ha:

$$V_i^{(A)}=V_A;\qquad i=1,2,\cdots,n \tag{3.10}$$

$$V_i^{(B)}=V_B;\qquad i=n+1,\cdots,n+m \tag{3.11}$$

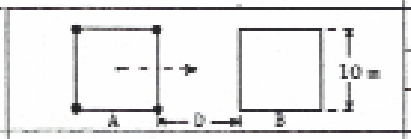
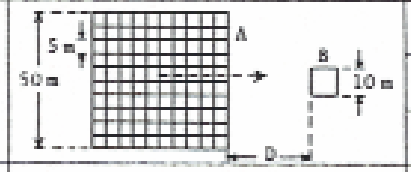
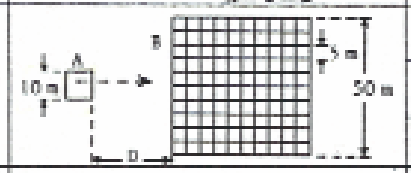
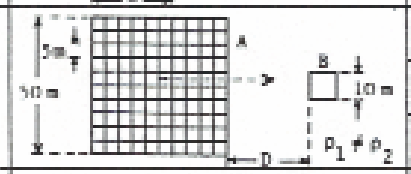
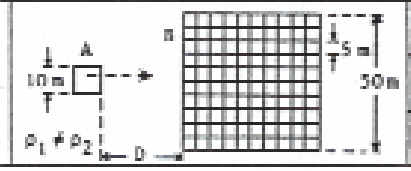
In definitiva si perviene ad un sistema di n+m+2 equazioni in altrettante incognite, costituite dalle n+m correnti disperse dalle diverse parti dei due elettrodi e dai potenziali assunti da questi V_A e V_B.
Risolvendo il sistema, una volta note le correnti delle singole parti di A e B, applicando ancora il principio di sovrapposizione degli effetti, è possibile ricavare il potenziale indotto in un qualsiasi punto della superficie del terreno. Dalla conoscenza di V_A e V_B e del potenziale sulla superficie del terreno si possono determinare le tensioni di contatto, nonché quelle di passo, che si manifestano in corrispondenza sia del dispersore attivo che di quello passivo. In tal modo, è possibile evidenziare eventuali situazioni di pericolo dovute al contatto di una persona con parti conduttrici accessibili della struttura inerte o con masse ad essa collegate, oppure dovute localmente alla presenza di elevati gradienti di potenziali sulla superficie del terreno.

3.3 CARATTERIZZAZIONE DEL FENOMENO DI INTERFERENZA E POTENZIALI TRASFERITI

Per caratterizzare in modo globale l'entità dei fenomeni di interferenza conduttiva, vengono definiti i seguenti parametri:

$$r_A^* = \frac{V_A}{I_F}; \qquad r_C = \frac{V_B}{I_F}; \qquad \mu = \frac{V_B}{V_A}.$$

Il primo parametro r^*_A è chiamato *resistenza propria* e rappresenta la tensione totale assunta dal dispersore attivo quando esso eroga nel terreno una corrente unitaria; l'asterisco serve ad indicare che il suo valore è diverso dalla resistenza di terra valutata in assenza dell'elettrodo inerte e, seppure di poco, in generale inferiore ad esso.
Il secondo parametro r_C è detto *resistenza di trasferimento* ed è dato dal valore del potenziale indotto sull'elettrodo inerte quando l'elettrodo attivo disperde nel terreno la corrente unitaria. Questo parametro è particolarmente significativo, in quanto denuncia il grado di accoppiamento resistivo tra elettrodo attivo ed elettrodo inerte, nel campo di corrente creato dal primo, e dipende, oltre che dalla configurazione e disposizione degli elettrodi, anche dalla resistività degli strati del terreno; nel caso di terreno omogeneo è proporzionale alla sua resistività.
Il terzo parametro μ è chiamato *coefficiente di accoppiamento* ed è indipendente dalla resistività del terreno.
In Tab. 3.1, per alcune configurazioni di elettrodi attivi (A) e inerti (B) e per alcuni valori della distanza *D* tra essi, sono riportati i valori assunti dai parametri prima definiti, ricavati applicando la metodologia di calcolo esposta al paragrafo precedente. Ove non espressamente specificato, il terreno è supposto omogeneo con resistività pari a 100 Ωm. Nel caso di terreno non omogeneo a due strati, si è supposto lo strato superficiale (spessore 20 m) di resistività ρ_1 = 100 Ωm e quello inferiore di resistività ρ_2 = 400 Ωm.
Dai valori riportati in tabella, si può osservare come la resistenza di trasferimento r_C tra due elettrodi comunque complessi assuma valore identico invertendo i ruoli di indotto e di inducente. Ciò significa che il potenziale trasferito su un dispersore passivo, per data corrente dispersa da quello attivo e distanza mutua, assume lo stesso valore scambiando i ruoli dei due dispersori; in altre parole, l'area

		D (m)	5	10	15	20	25	30	35
1		r_A^* (Ω)	3.860	3.880	3.890	3.890	3.890	3.890	
		r_C (Ω)	1.130	0.875	0.652	0.539	0.460	0.402	
		100 . μ	29.200	21.200	16.700	13.900	11.800	10.300	
2		r_A^* (Ω)		0.905	0.905		0.905		0.905
		r_C (Ω)		0.431	0.377		0.303		0.253
		100 . μ		47.660	41.680		33.440		27.960
3		r_A^* (Ω)		5.354	5.396		5.427		5.438
		r_C (Ω)		0.431	0.377		0.303		0.253
		100 . μ		8.050	6.989		5.577		4.655
4		r_A^* (Ω)		1.520	1.520		1.520		1.520
		r_C (Ω)		0.983	0.908		0.793		0.707
		100 . μ		64.700	59.800		52.900		46.500
5		r_A^* (Ω)		6.010	6.067		6.113		6.135
		r_C (Ω)		0.983	0.908		0.793		0.707
		100 . μ		16.347	14.969		12.981		11.520

Tab. 3.1

di influenza di un dispersore non dipende dalle sue dimensioni, bensì dal valore della corrente da esso dispersa e dalla resistività del terreno. Se i due dispersori sono di dimensioni notevolmente diverse, il rapporto μ tra il potenziale indotto sul dispersore passivo e quello assunto dal dispersore attivo cambia di molto invertendo i ruoli.

Si può notare, anche, come il valore di r_A^* rimane invariato nel caso in cui l'elettrodo disperdente abbia dimensioni molto più grandi rispetto all'elettrodo inerte, qualunque sia la distanza a cui è posto quest'ultimo, coincidendo con il valore della resistenza di terra valutata in assenza di esso.

Infine, si vede come il grado di accoppiamento, per una stessa coppia di elettrodi, dipende molto dalla stratificazione del terreno; in particolare, la presenza di uno strato inferiore di più elevata resistività aumenta l'accoppiamento mutuo tra gli elettrodi rispetto al caso di terreno omogeneo.

3.3.1 Esempi numerici

Al fine di quantificare numericamente, seppure in maniera molto esemplificativa, il potenziale trasferito su una struttura inerte, nonché le tensioni pericolose che in corrispondenza di essa possono manifestarsi, si consideri il sistema n. 1 di Tab. 3.1, in cui come elettrodo attivo si ha un dispersore quadrato con picchetti (A) e come elettrodo inerte un dispersore quadrato semplice (B).

In Fig. 3.2 è riportato l'andamento del potenziale sulla superficie del terreno nella direzione mediana, in percento della tensione totale di A, per due diverse posizioni del dispersore passivo; per confronto, in tratteggio è riportato anche l'andamento del potenziale indisturbato, ossia valutato in assenza del dispersore passivo.

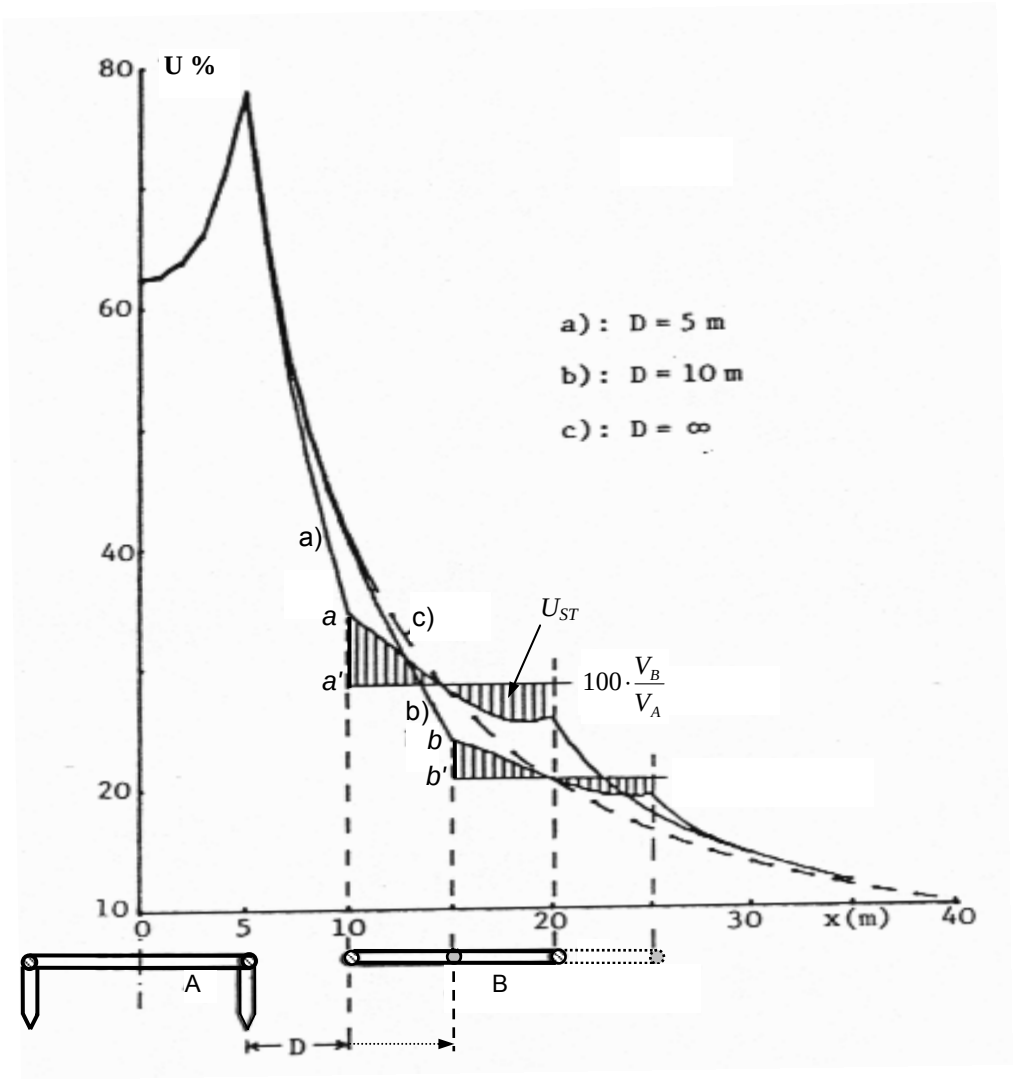


Fig. 3.2

Si nota, innanzitutto, come in corrispondenza dell'elettrodo inerte si ha una deformazione del profilo di potenziale, con gradienti più elevati che comportano un aumento delle tensioni di passo. Il valore del potenziale assunto dall'elettrodo inerte, in percento della tensione totale V_A dell'elettrodo disperdente, corrisponde al valore di potenziale sulla superficie del terreno in corrispondenza del centro dell'elettrodo; tale valore è individuato nel grafico, nei due casi esaminati, dall'ordinata V_B / V_A x 100. I segmenti verticali tracciati sullo stesso grafico indicano i valori percentuali (rispetto a V_A) delle tensioni di contatto (U_{ST}) che si manifestano all'interno del perimetro del dispersore inerte su masse e masse estranee accessibili collegate ad esso.

Assumendo che la corrente dispersa nel terreno da parte di A sia I_F = 1000 A, dai valori della resistenza propria (r^*_A) e della resistenza di trasferimento (r_C) riportati in Tab. 3.1, si possono ricavare i valori della tensione totale di A e del potenziale trasferito su B:

- per *D* = 5 m;

$$V_A = r_A^* \cdot I_F = 3.860 \cdot 1000 = 3860\,\text{V}$$

$$V_B = r_C \cdot I_F = 1.130 \cdot 1000 = 1130\,\text{V}$$

- per *D* = 10 m;

$$V_A = r_A^* \cdot I_F = 3.880 \cdot 1000 = 3880\,\mathrm{V}$$

$$V_B = r_C \cdot I_F = 0.825 \cdot 1000 = 825\,\mathrm{V}$$

Eventuali masse e masse estranee collegate al dispersore B assumono rispetto all'infinito lo stesso valore di potenziale V_B; su di esse pertanto si possono manifestare tensioni di contatto pericolose. La tensione di contatto massima all'interno del perimetro di B, rappresentata in figura dai segmenti a-a' (*D* = 5 m) e b-b' (*D* = 10 m), vale:

- *D* = 5 m; $U_{ST,max}$ % = $\overline{a-a'}$ ≈ 6 %; in valore assoluto: $U_{ST,\max} = \dfrac{U_{ST,\max}\% \cdot V_A}{100} = \dfrac{6\,x\,3860}{100} = 232\,\mathrm{V}$

- *D* = 10 m; $U_{ST,max}$ % = $\overline{b-b'}$ ≈ 3 %; in valore assoluto: $U_{ST,\max} = \dfrac{U_{ST,\max}\% \cdot V_A}{100} = \dfrac{3\,x\,3880}{100} = 116\,\mathrm{V}$

Ovviamente, se la massa o massa estranea si trova all'esterno del perimetro del dispersore B, in punti del terreno dove il potenziale sulla sua superficie è prossimo a zero, la tensione di contatto tende ad assumere un valore pari alla tensione totale di B.

Si consideri adesso la situazione rappresentata schematicamente in Fig. 3.2, in cui una recinzione metallica con paletti metallici è posta nelle vicinanze di un dispersore magliato chiamato a disperdere una data corrente di guasto a terra. I paletti si suppongono infissi fino a una profondità di 1 m e si ritiene trascurabile la caduta di tensione lungo la recinzione.

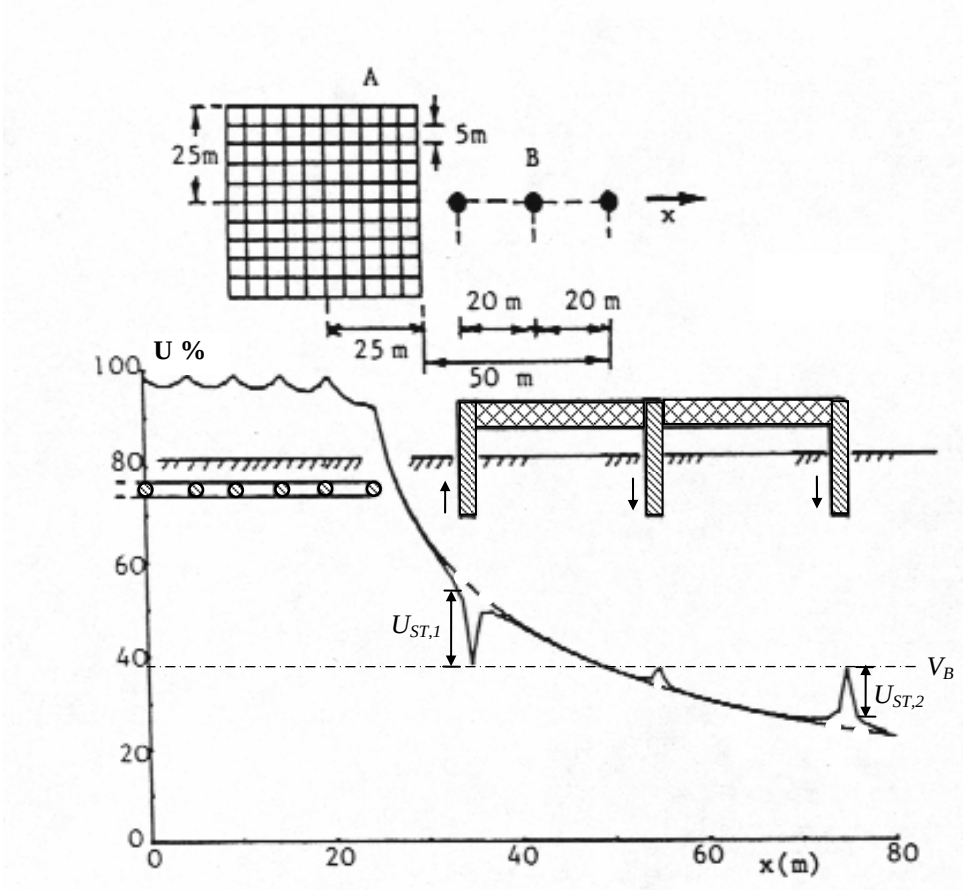


Fig. 3.2

Applicando la metodologia di calcolo prima esposta, considerando l'intera recinzione come unico elettrodo, si ottiene l'andamento del potenziale sulla superficie del terreno nella direzione segnata (x) riportato in figura, in percento della tensione totale del dispersore.
Il paletto più vicino al dispersore raccoglie parte della corrente dispersa da questo (circa il 3%), la quale viene rilasciata nel terreno dagli altri due; si giustificano in tal modo il picco di potenziale verso il basso in corrispondenza del primo e quelli verso l'alto in corrispondenza degli altri.
La retta orizzontale in tratteggio passante per i tre valori di picco del potenziale, in corrispondenza dei paletti, individua sull'asse delle ordinate il potenziale a cui si porta la recinzione in valore percentuale rispetto alla tensione totale del dispersore. Alle due estremità della recinzione si possono manifestare le tensioni di contatto indicate in figura, valutate come differenza tra V_B e il valore del potenziale sulla superficie del terreno a distanza di un metro dalla recinzione stessa. Attraverso il grafico si può approssimativamente valutare:

V_B % = 37,8 % ; $U_{ST,1}$ % = 16,6 % ; $U_{ST,2}$ % = 11,7 %

Assumendo per la corrente di guasto il valore di 1000 A (il terreno è considerato omogeneo di resistività ρ = 100 Ωm), la tensione totale del dispersore si ottiene dal prodotto della corrente per la resistenza di terra; quest'ultima si può ricavare dalla Tab. 3.1, facendo riferimento al sistema n. 2 e al valore riportato per r^*_A pari a 0,905 Ω.
Si ha pertanto:

$$V_A = 0{,}905 \times 1000 = 905 \text{ V} ;$$

per cui:

V_B = 342 V ; $U_{ST,1}$ = 150 V ; $U_{ST,2}$ = 105 V

Le tensioni di passo massime, valutate alle due estremità a un metro dalla recinzione, assumono approssimativamente gli stessi valori calcolati prima per le tensioni di contatto.

La situazione rappresentata in Fig. 3.3 considera il caso di una recinzione molto estesa e tale che gran parte dei paletti si trovino fuori dall'area di influenza del dispersore. Ai fini dello studio dell'interferenza conduttiva, si considerano allora solo i paletti più vicini; degli altri si può tenere conto a mezzo dell'ammettenza equivalente (Y_E) vista dal sistema verso l'esterno (vedi appresso § 3.4.3).
Come mostra la figura, in questo caso il potenziale assunto dalla recinzione è molto più basso, condizionato soprattutto dal potenziale della parte più distante di essa in contatto con punti del terreno a potenziale quasi nullo. Su di essa, pertanto, si possono avere tensioni di contatto elevatissime; ciò non soltanto in corrispondenza dell'estremità vicina al dispersore, ma anche in corrispondenza dell'estremità lontana, dove gran parte della corrente raccolta inizialmente dalla parte più vicina viene rilasciata nel terreno dando luogo ad un innalzamento locale del potenziale sulla superficie del terreno.
In corrispondenza delle estremità si possono avere anche tensioni di passo pericolose dovute agli elevati gradienti di potenziale che vi si manifestano.

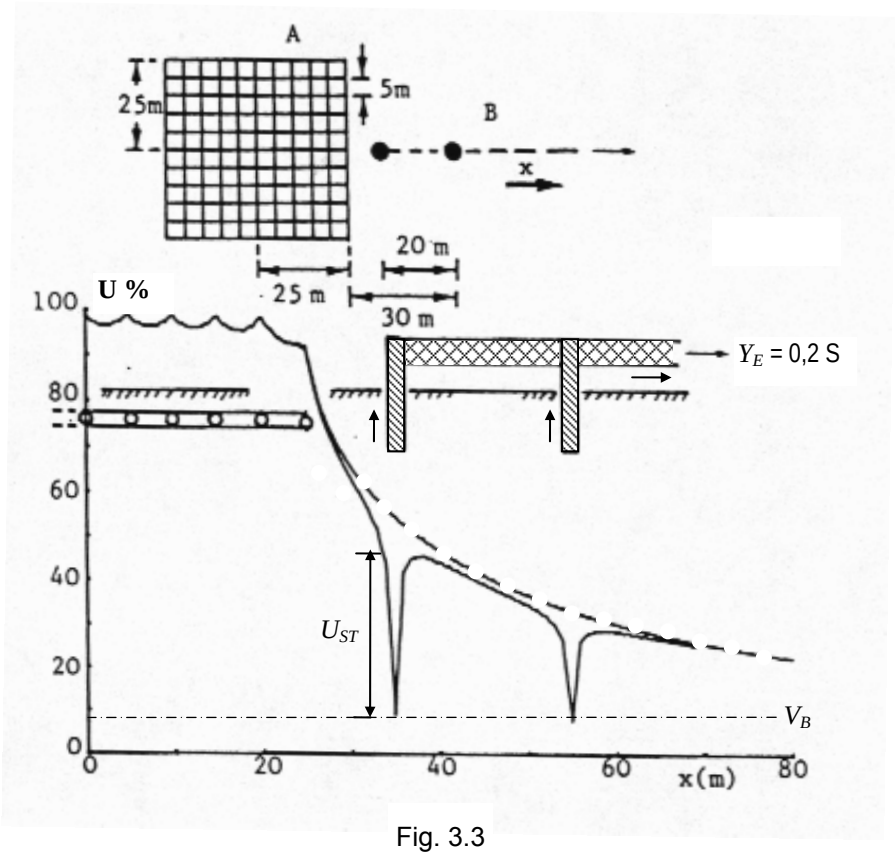


Fig. 3.3

Ragionando in modo analogo a quanto fatto prima, approssimativamente si ha:

V_B % = 8 % ; U_{ST} % = 38 % ; in valore assoluto: V_B = 72,4 V ; U_{ST} = 344 V.

3.4 GENERALIZZAZIONE DELLA METODOLOGIA DI CALCOLO

La metodologia di calcolo esposta al § 3.2 può essere generalizzata e applicata a situazioni diverse in cui si possono manifestare i fenomeni prima descritti dovuti all'interferenza conduttiva tra elettrodi interrati. Si può avere il caso, ad esempio, di più elettrodi inerti, isolati tra loro oppure metallicamente collegati; alcuni di essi, inoltre, possono essere interrati a notevole distanza dall'elettrodo disperdente, fuori dell'area di influenza di esso (vedi § precedente). Ancora, diverso è il caso di elettrodo inerte "lungo", capace di scambiare con continuità corrente con il terreno e sede di caduta di tensione tra le sue parti, dovuta alla corrente longitudinale che lo percorre.

Nel seguito vengono presentati in maniera schematica alcuni casi tipici di interferenza conduttiva, riferite a situazioni diverse che si possono presentare nella realtà. Per ciascun caso viene impostato il sistema di equazioni che consente di effettuare lo studio, applicando la metodologia prima esposta, al fine di valutare il potenziale sulla superfici del terreno e le tensioni pericolose trasferite sugli elettrodi inerti, rimandando al § 3.2 per i successivi sviluppi.

3.4.1 Elettrodi inerti non metallicamente collegati tra di loro

Si possono avere più elettrodi inerti B_1, B_2, …, B_k, isolati tra di loro e posti all'interno dell'area di influenza di A, come schematicamente rappresentato in Fig. 3.4 nell'ipotesi di k = 3.

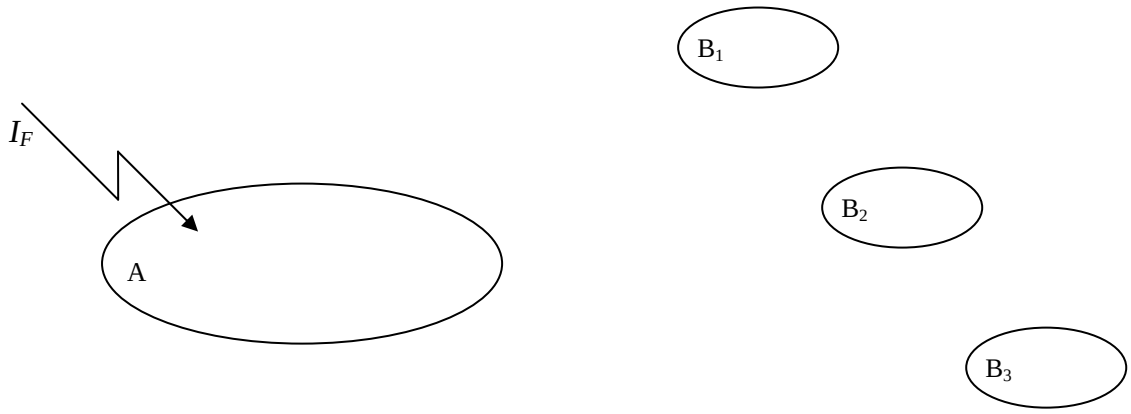


Fig. 3.4

Con le stesse notazioni simboliche adottate al § 3.2, il sistema di equazioni che rende determinato il problema è così formato:

- equazioni di campo

$$[\boldsymbol{V}] = [\boldsymbol{R}] \cdot [\boldsymbol{I}]$$

- relazioni ausiliarie

$$\sum_{i=1}^{n} I_i^{(A)} = I_F$$

$$\sum_i I_i^{(B1)} = 0; \quad \sum_i I_i^{(B2)} = 0; \quad \sum_i I_i^{(B3)} = 0$$

- ipotesi di equipotenzialità

$$V_i^{(A)} = V_A$$

$$V_i^{(B1)} = V_{B1}; \quad V_i^{(B2)} = V_{B2}; \quad V_i^{(B3)} = V_{B3}$$

formato da n+$m1$+$m2$+$m3$+4 equazioni algebriche ($m1$, $m2$, $m3$ sono le parti in cui sono stati suddivisi i tre elettrodi inerti) in altrettante incognite, n+$m1$+$m2$+$m3$ correnti più V_A, V_{B1}, V_{B2} e V_{B3}.

3.4.2 Elettrodi inerti metallicamente collegati tra loro (Fig. 3.5)

In tal caso il collegamento tra gli elettrodi inerti, sul quale non è possibile trascurare la caduta di tensione, viene rappresentato a mezzo dell'impedenza omopolare propria Z_0.

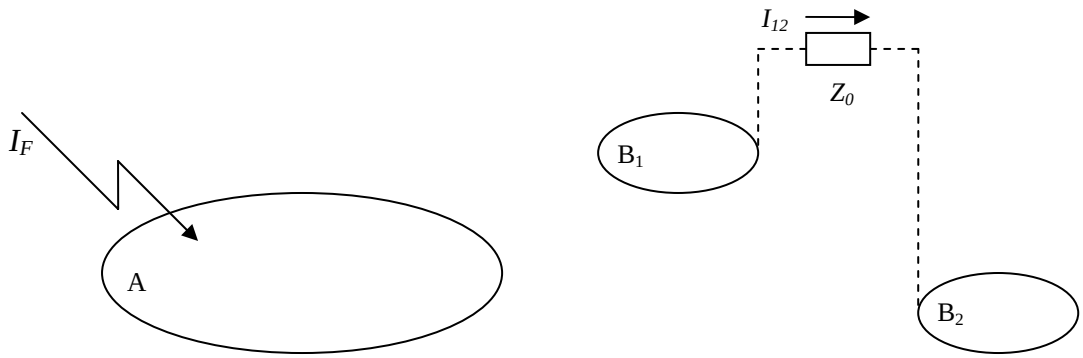


Fig. 3.5

Il sistema di equazioni che rende determinato il problema è il seguente:

- equazioni di campo

$$[\boldsymbol{V}] = [\boldsymbol{R}] \cdot [\boldsymbol{I}]$$

- relazioni ausiliarie

$$\sum_{i=1}^{n} I_i^{(A)} = I_F$$

$$\sum_i I_i^{(B1)} + \sum_i I_i^{(B2)} = 0$$

$$V_{B1} - V_{B2} = Z_0 \cdot I_{12} = Z_0 \cdot \sum_i I_i^{(B1)}$$

- ipotesi di equipotenzialità

$$V_i^{(A)} = V_A$$

$$V_i^{(B1)} = V_{B1}; \qquad V_i^{(B2)} = V_{B2}$$

in cui si hanno n+$m1$+$m2$+3 equazioni in altrettante incognite, n+$m1$+$m2$ correnti più V_A, V_{B1}, e V_{B2}.

3.4.3 Sistema inerte con parti fuori dall'area di influenza dell'elettrodo disperdente (Fig. 3.6)

Si tiene conto delle parti del sistema di elettrodi inerti poste a notevole distanza dall'elettrodo disperdente, fuori quindi dalla sua area di influenza, a mezzo dell'ammettenza equivalente Y_E (in modulo) vista da entrambi i lati del sistema preso in considerazione per lo studio.

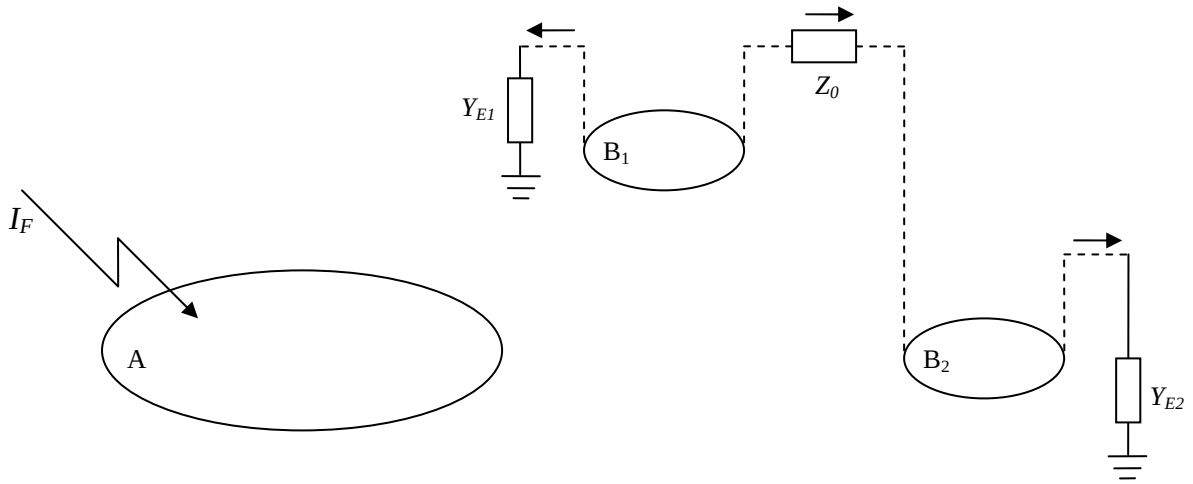


Fig. 3.6

Il sistema di equazioni in tal caso è il seguente:

- equazioni di campo

$$[\boldsymbol{V}] = [\boldsymbol{R}] \cdot [\boldsymbol{I}]$$

- relazioni ausiliarie

$$\sum_{i=1}^{n} I_i^{(A)} = I_F$$

$$\sum_i I_i^{(B1)} + \sum_i I_i^{(B2)} = V_{B1} \cdot Y_{E1} + V_{B2} \cdot Y_{E2}$$

$$V_{B1} - V_{B2} = Z_0 \cdot (\sum_i I_i^{(B1)} - V_{B1} \cdot Y_{E1})$$

- ipotesi di equipotenzialità

$$V_i^{(A)} = V_A$$

$$V_i^{(B1)} = V_{B1}; \qquad V_i^{(B2)} = V_{B2}$$

con lo stesso numero di equazioni e incognite del caso precedente.

Il caso adesso considerato può rappresentare nella realtà, ad esempio, la situazione di una sottostazione nelle cui vicinanze è presente una linea aerea non facente capo all'impianto della sottostazione. Gli elettrodi B_1 e B_2 di Fig. 3.6 rappresentano in tal caso i dispersori dei sostegni di linea che si trovano all'interno dell'area di influenza del dispersore della sottostazione, rappresentato dall'elettrodo A, e che risultano collegati tra loro a mezzo della fune di guardia della linea aerea.
In caso di guasto a terra in stazione, in corrispondenza dei tralicci si possono manifestare tensioni pericolose di contatto e di passo in relazione al potenziale indotto dalla corrente di guasto sui dispersori di questi e sulla superficie del terreno circostante. In Fig. 3.7 sono riportati i risultati ottenuti applicando la metodologia di calcolo esposta.

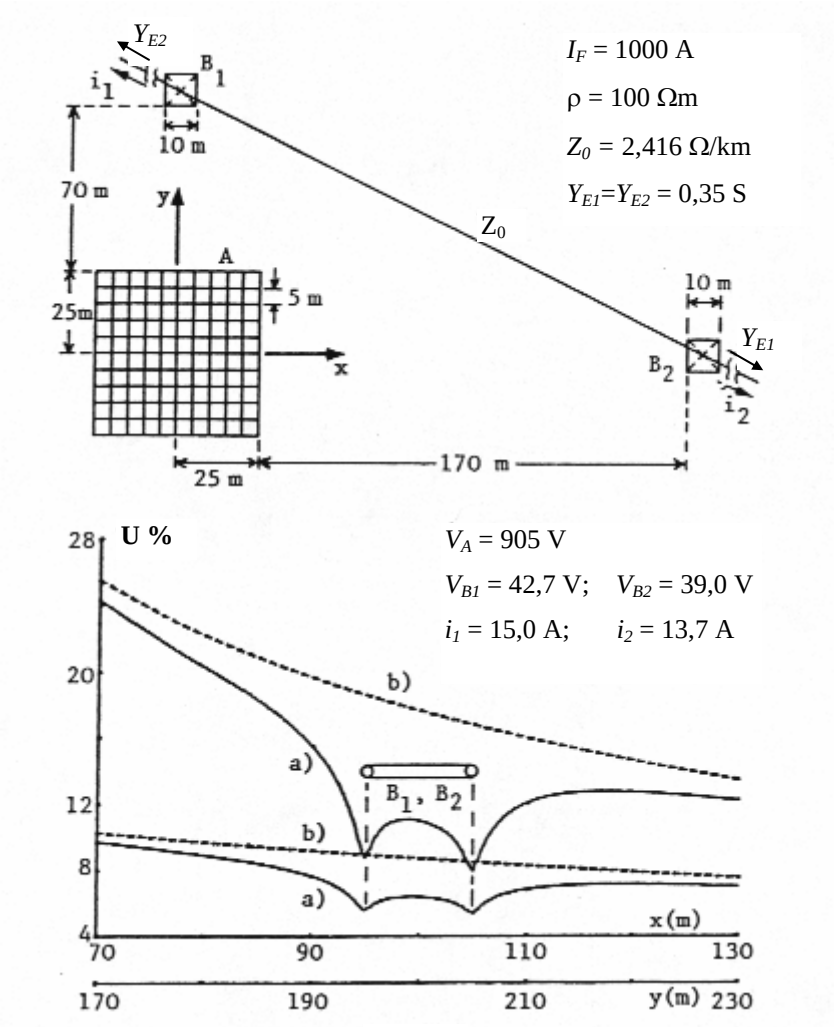


Fig. 3.7

3.4.4 Elettrodo inerte lungo (Fig. 3.8)

Si considera in questo caso un elettrodo lungo, in contatto con il terreno e in grado di scambiare corrente con esso con continuità, sede di caduta di tensione longitudinalmente. Può trattarsi dunque di tubazioni metalliche, binari ferroviari, guaine metalliche di cavi, ecc. che fuoriescono da una sottostazione, e che non sono collegati al dispersore di terra di essa, oppure che passano nelle vicinanze della sottostazione.

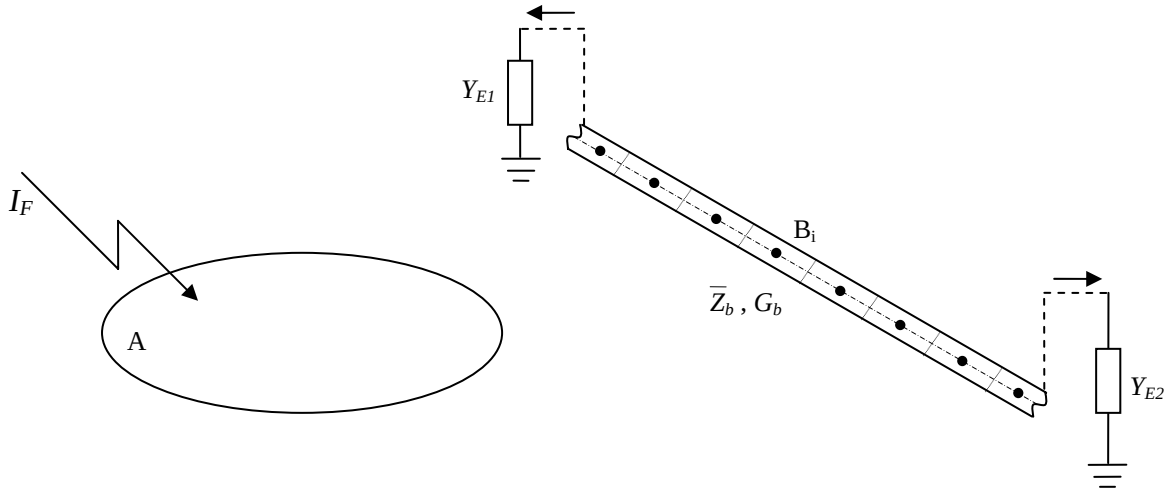


Fig. 3.8

L'elettrodo lungo può essere caratterizzato a mezzo della sua impedenza omopolare longitudinale per unità di lunghezza (Z_b) e dalla conduttanza trasversale per unità di lunghezza (G_b). Attraverso tali grandezze si ricavano l'impedenza caratteristica (Z_i) e da questa le ammettenze equivalenti (Y_{E1} e Y_{E2}), con cui si tiene conto delle restanti parti esterne al campo di corrente creato nel terreno dall'elettrodo attivo; si ha:

$$\overline{Z_i} = \sqrt{\frac{\overline{Z_b}}{G_b}}\,; \qquad Y_{E1,2} = \frac{1}{Z_i}$$

Si suddivide poi l'elettrodo in elementi di lunghezza molto piccola rispetto alla sua lunghezza caratteristica [$\lambda = 1/\sqrt{(Z_b\, G_b)}$] e si adottano alcune ipotesi semplificative; ossia, si suppone che la corrente venga scambiata con il terreno da ciascun elemento con legge lineare e si assume come potenziale caratteristico di ciascuno di essi il potenziale valutato in corrispondenza del punto centrale di una sua generatrice. In questo modo il sistema di Fig. 3.8 è riconducibile al caso esaminato al punto precedente.

La Fig. 3.9 riguarda il caso di un sistema comprendente la guaina metallica di un cavo interrato, privo di guaina esterna isolante, in grado di scambiare corrente con il terreno con continuità. Sono mostrati i risultati ottenuti applicando la metodologia di calcolo esposta, riportando il diagramma delle correnti prelevate dal terreno dai diversi elementi in cui si è supposta suddivisa la guaina del cavo e l'andamento del potenziale che essi assumono verso l'infinito, in percento della tensione totale del dispersore. Il tratto di cavo preso in considerazione ha lunghezza 100 m ed è stato suddiviso in 300 parti.

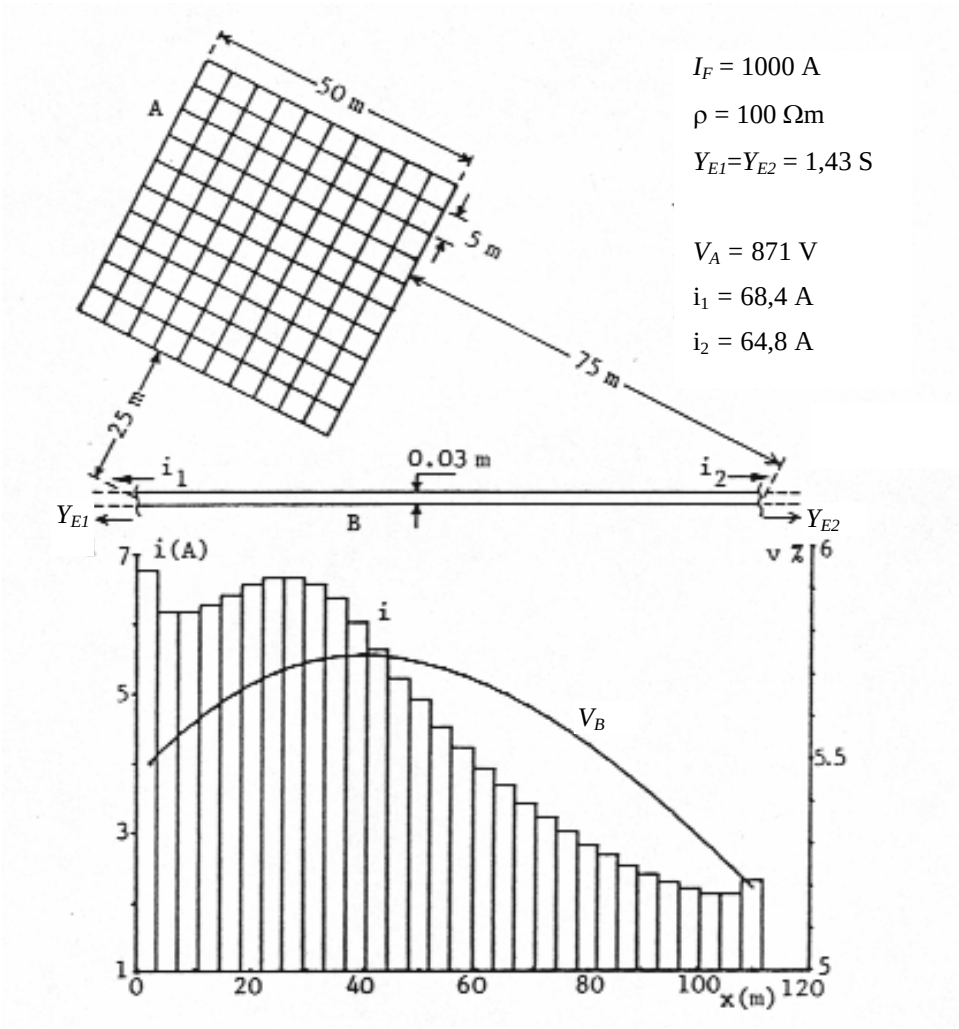


Fig. 3.9

3.4.5 Elettrodi metallicamente collegati all'elettrodo disperdente **(Fig. 3.10)**

Non si può più parlare in questo caso di elettrodi inerti, in quanto essi prendono parte attivamente alla dispersione a terra di una aliquota della corrente I_F, convogliata su essi attraverso il collegamento al dispersore principale, comportandosi di fatto come dei dispersori ausiliari. Può trattarsi in tal caso di tubazioni metalliche, binari, guaine di cavi, ecc. che fuoriescono da una sottostazione e che sono collegati al dispersore di terra di essa, oppure una linea aerea con f.d.g che esce dalla sottostazione.

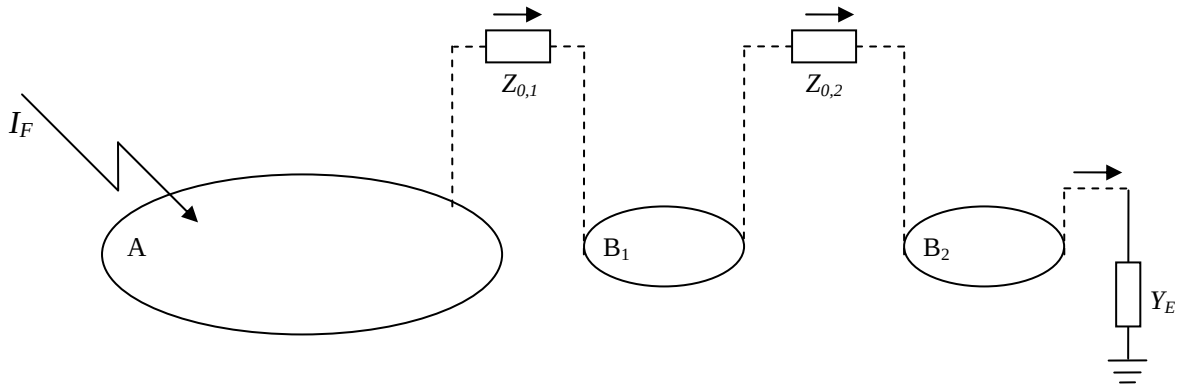


Fig. 3.10

Il sistema di equazioni in questo caso è il seguente:

- equazioni di campo

$$[\boldsymbol{V}] = [\boldsymbol{R}] \cdot [\boldsymbol{I}]$$

- relazioni ausiliarie

$$\sum_i I_i^{(A)} + \sum_i I_i^{(B1)} + \sum_i I_i^{(B2)} + V_{B2} \cdot Y_E = I_F$$

$$V_A - V_{B1} = Z_{0,1} \cdot (I_F - \sum_i I_i^{(A)})$$

$$V_{B1} - V_{B2} = Z_{0,2} \cdot (I_F - \sum_i I_i^{(A)} - \sum_i I_i^{(B1)})$$

- ipotesi di equipotenzialità

$$V_i^{(A)} = V_A$$

$$V_i^{(B1)} = V_{B1}; \qquad V_i^{(B2)} = V_{B2}$$

in cui si hanno n+$m1$+$m2$+3 equazioni in altrettante incognite, n+$m1$+$m2$ correnti più V_A, V_{B1}, e V_{B2}.

La Fig. 3.11 riporta i risultati ottenuti applicando la metodologia esposta al caso di una linea aerea con fune di guardia collegata al dispersore della stazione elettrica a cui essa fa capo. In questo caso, attraverso la fune di guardia parte della corrente di guasto viene drenata verso l'esterno della stazione e rilasciata nel terreno in corrispondenza dei sostegni attraverso i dispersori degli stessi. In corrispondenza dei primi sostegni, in particolare, si possono manifestare tensioni di contatto e di passo pericolose, dovute al potenziale assunto dai dispersori a cui essi sono collegati e dai valori di potenziale che si manifestano sulla superficie del terreno attorno ad essi come mostrato in figura.

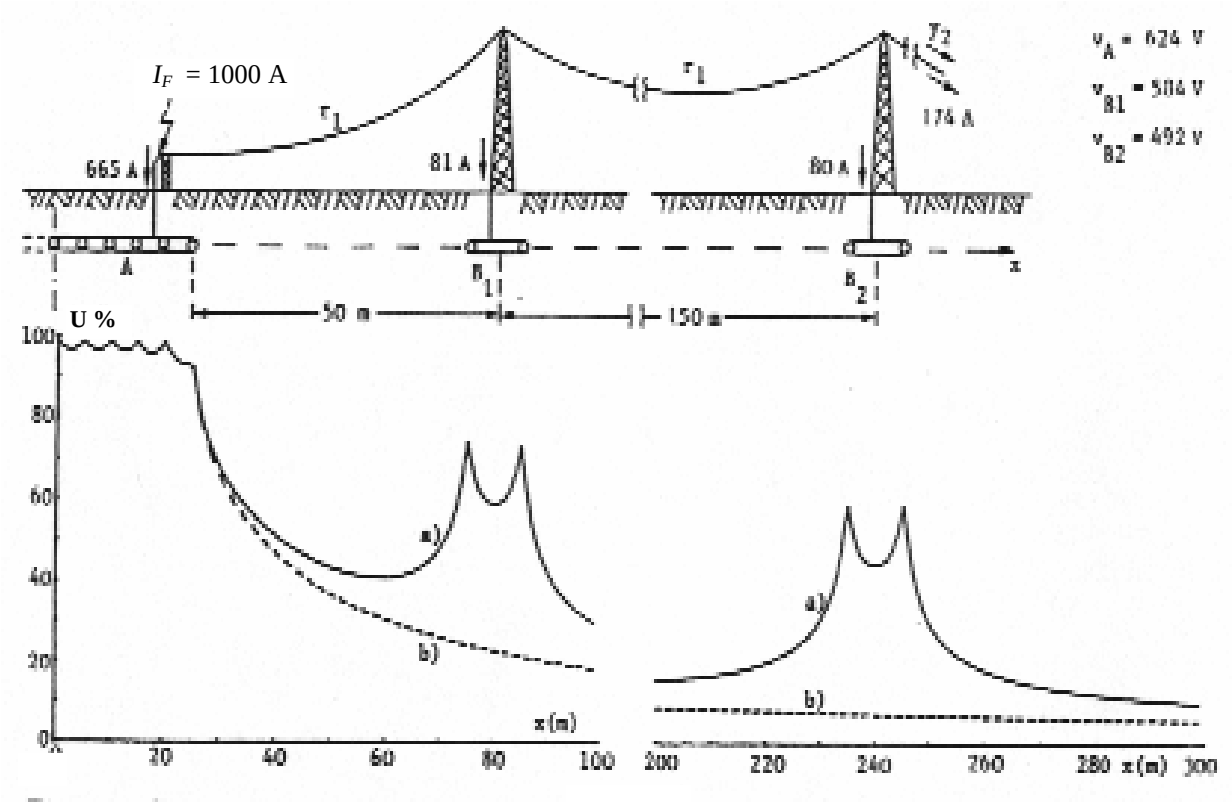


Fig. 3.11

3.5. PROVVEDIMENTI NEI CONFRONTI DEI POTENZIALI PERICOLOSI TRASFERITI

I potenziali trasferiti costituiscono uno dei problemi più seri degli impianti di terra, soprattutto nelle stazioni in alta tensione. Da quanto prima esposto, tali problemi possono riguardare corpi metallici inerti interrati, o in contatto con la superficie del terreno, posti nelle vicinanze del dispersore di stazione e non collegate ad esso, oppure strutture metalliche collegate al dispersore di stazione (masse estranee), le quali estendendosi all'esterno della stessa possono trasferire a notevole distanza la tensione totale di terra di stazione. Come già precedentemente discusso, casi tipici sono tubazioni metalliche di ogni specie (acquedotti, oleodotti, gasdotti, ecc.), recinzioni metalliche, binari, nastri trasportatori, linee aeree, ecc.

Vengono di seguito descritte alcune delle misure di protezione atte ad eliminare o a contenere il pericolo dovuto ai potenziali trasferiti nel caso delle masse estranee presenti all'interno della stazione e che si estendono al di fuori del perimetro del dispersore.

In tutti gli altri casi occorre valutare di volta in volta, già in sede di progetto del dispersore (ma anche in fase di verifica), i provvedimenti migliorativi applicabili al caso. Tali provvedimenti possono riguardare sia il dispersore, migliorandone (nella fase di progetto) le prestazioni con una opportuna scelta della configurazione, sia le strutture inerti, ad esempio rendendole inaccessibili (mediante segregazione o isolamento delle parti accessibili), realizzando intorno ad esse una pavimentazione sufficientemente isolante oppure interrompendone la continuità metallica (vedi appresso).

3.5.1 Tubazioni

Le tubazioni possono essere fuori terra oppure interrate. Nel primo caso si possono impiegare giunti isolanti, o coppie di giunti isolanti, opportunamente distanziati tra loro, posti a cavallo del perimetro del dispersore (Fig. 3.12).

Sulle selle di appoggio, a monte e a valle del giunto, o tra i due giunti isolanti, la tubazione dovrà essere isolata dal terreno. Inoltre, se il fluido trasportato è acqua o altro fluido relativamente conduttore, anche la superficie interna della tubazione dovrà essere ricoperta con materiale isolante, ad evitare il ponticellamento del giunto da parte del fluido. Nessuna preoccupazione invece desta la colonna di fluido, essendo la resistività di esso di gran lunga maggiore rispetto a quella del materiale conduttore con cui in genere è realizzata la tubazione.

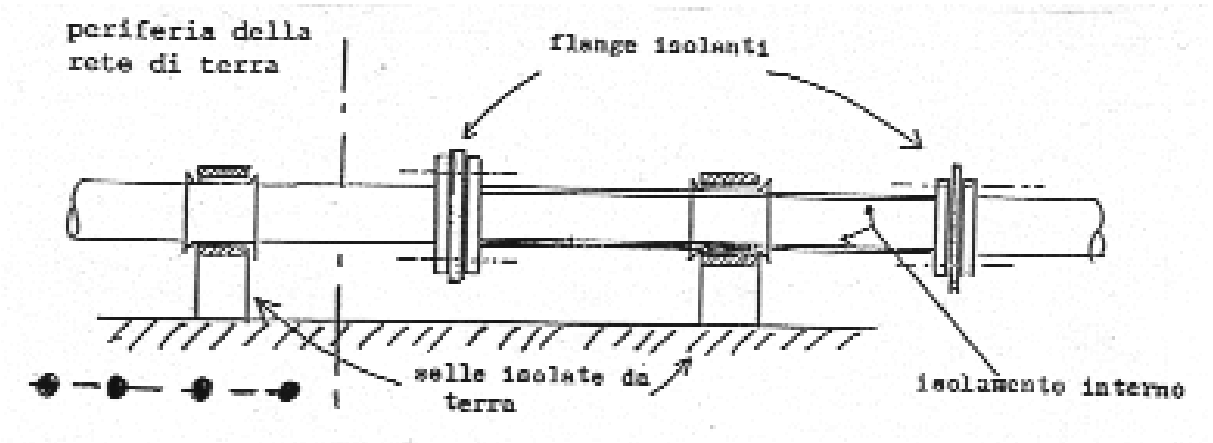


Fig. 3.12

Nel caso invece in cui la tubazione è interrata, occorre interromperne la continuità metallica realizzando a cavallo del perimetro del dispersore un tratto in materiale isolante di opportuna lunghezza (almeno 10 m), come mostrato in Fig. 3.13. Se dalle verifiche dovessero ancora risultare potenziali pericolosi trasferiti all'esterno l'interruzione dovrà essere ripetuta.

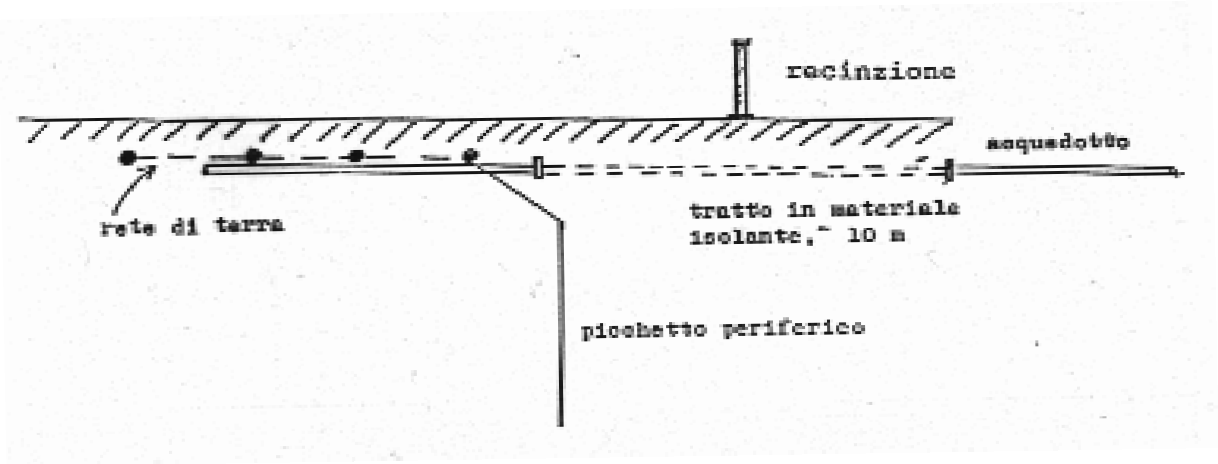


Fig. 3.13

3.5.2 Binari ferroviari

I binari ferroviari che entrano nella stazione o nello stabilimento devono essere interrotti, per una certa estensione all'esterno dell'impianto di terra, mediante una coppia di appositi giunti isolanti (Fig. 3.13). E' opportuno porre i giunti ad una distanza tra loro superiore alla lunghezza massima prevedibile del convoglio ferroviario, onde evitare che essi siano ponticellati dagli stessi vagoni. Tale provvedimento, ovviamente, non è applicabile nel caso di trazione elettrica.

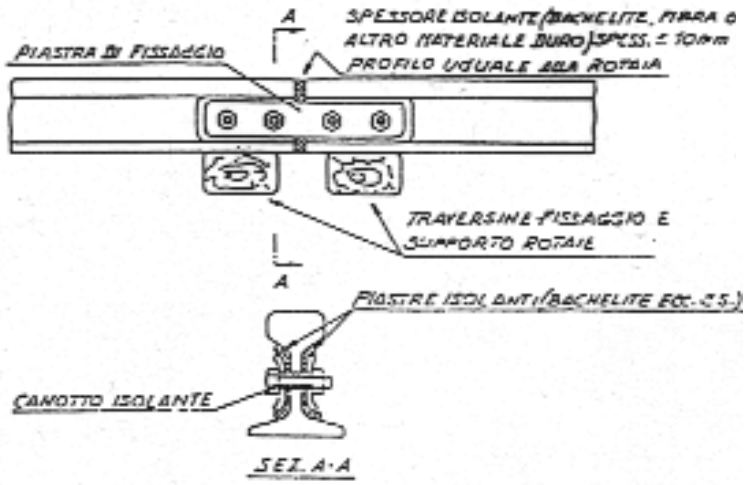

A
SPESSORE ISOLANTE (BACHELITE, FIBRA O ALTRO MATERIALE DURO) SPESS. ≥ 10 mm
PIASTRA DI FISSAGGIO
PROFILO UGUALE ALLA ROTAIA
TRAVERSINE FISSAGGIO E SUPPORTO ROTAIE
A
PIASTRE ISOLANTI (BACHELITE ECC. ≥ 5)
CANOTTO ISOLANTE
SEZ. A-A

Fig. 3.13

3.5.3 Recinzioni

Le recinzioni interne al perimetro del dispersore devono essere collegate allo stesso dispersore come qualsiasi massa o massa estranea presente.

Le recinzioni esterne, ad esempio quelle che delimitano la proprietà, se collegate allo stesso impianto di terra possono trasferire all'esterno tensioni pericolose; la persona che tocca la recinzione dall'esterno potrebbe, infatti, essere sottoposta ad una tensione di contatto elevatissima. La soluzione

radicale sarebbe quella di realizzare la recinzione in materiale isolante, quale muratura, prefabbricati di cemento o simili. Tuttavia, se metallica è opportuno tenerla isolata dall'impianto di terra di stazione; ovviamente tale separazione sarà tanto più efficace quanto più distante è la recinzione dalla periferia del dispersore.

Qualora, data la vicinanza della recinzione al dispersore, in relazione al potenziale indotto su di essa e sulla superficie del terreno, si dovessero rilevare in fase di verifica tensioni di contatto esterne pericolose (superiori al limite imposto dalle norme), si potrà migliorare la situazione interrando lungo la recinzione all'esterno (a distanza di un metro e alla profondità di 0,5 m) un conduttore nudo ad essa collegato; tale conduttore avrebbe lo scopo di controllare il potenziale sulla superficie del terreno, innalzandolo, al fine di ridurre localmente le tensioni di contatto. In alternativa, ove possibile e economicamente giustificato, si può realizzare lungo la recinzione una pavimentazione sufficientemente isolante, mediante asfaltatura o una massicciata di pietrisco.

3.5.4 Cancelli

Il cancello ad azionamento manuale o elettrico se interno al perimetro del dispersore dovrà essere collegato all'impianto di terra come qualsiasi massa estranea. Se invece è posto molto distante dal dispersore ed è ad azionamento manuale, sarà tenuto libero oppure collegato all'eventuale dispersore separato realizzato lungo la recinzione.

Se il cancello è azionato elettricamente, la massa del motore dell'azionamento dovrà essere collegata a terra; ciò può essere effettuato mediante un proprio dispersore, ad esempio un picchetto, o utilizzando il dispersore separato della recinzione se presente.

CAPITOLO 4

SIMULAZIONE DELL'UOMO PER LA VALUTAZIONE DELLE TENSIONI DI CONTATTO E DI PASSO EFFETTIVE

4.1 INTRODUZIONE

E' noto che la presenza dell'uomo nel campo di corrente creato nel mezzo da un elettrodo di terra che disperde la corrente di guasto a terra può ridurre notevolmente il valore delle tensioni di contatto e di passo ad esso applicate (tensioni effettive), rispetto ai valori calcolati in assenza della persona (tensioni a vuoto). Di tale favorevole circostanza le Norme consentono di tenere conto nella fase di verifica del dispersore di una stazione elettrica, prima della messa in servizio dell'impianto, prescrivendo una idonea strumentazione di misura che simuli tale presenza. In particolare, per la misura delle tensioni di contatto e di passo le Norme indicano l'utilizzo di un voltmetro avente resistenza interna 1 kΩ, convenzionalmente pari alla resistenza del corpo umano, e di due piastre di misura di dimensioni 200 cm^2 poggiate sul terreno, che simulano i piedi della persona (Fig. 4.1).

La metodologia generale di calcolo per dispersori complessi esposta in precedenza, che fa ricorso al metodo di simulazione degli elettrodi, mediante sorgenti lineari di corrente, e al metodo delle sottoaree di Maxwell, non tiene conto, a favore della sicurezza, della presenza dell'uomo; pertanto, i valori delle tensioni di contatto e di passo così ricavati sono quelli a vuoto. La riduzione dei valori delle tensioni pericolose effettive rispetto ai valori a vuoto dipende dalla resistività del terreno ed aumenta con essa. Per valori di resistività medio-alti, ad esempio 500÷1000 Ω.m, la differenza tra valori a vuoto ed effettivi è piuttosto elevata, dell'ordine del 50÷65% per le tensioni di contatto e del 70÷80% per quelle di passo. Pertanto, in questi casi, nella scelta della configurazione ottimale del dispersore in

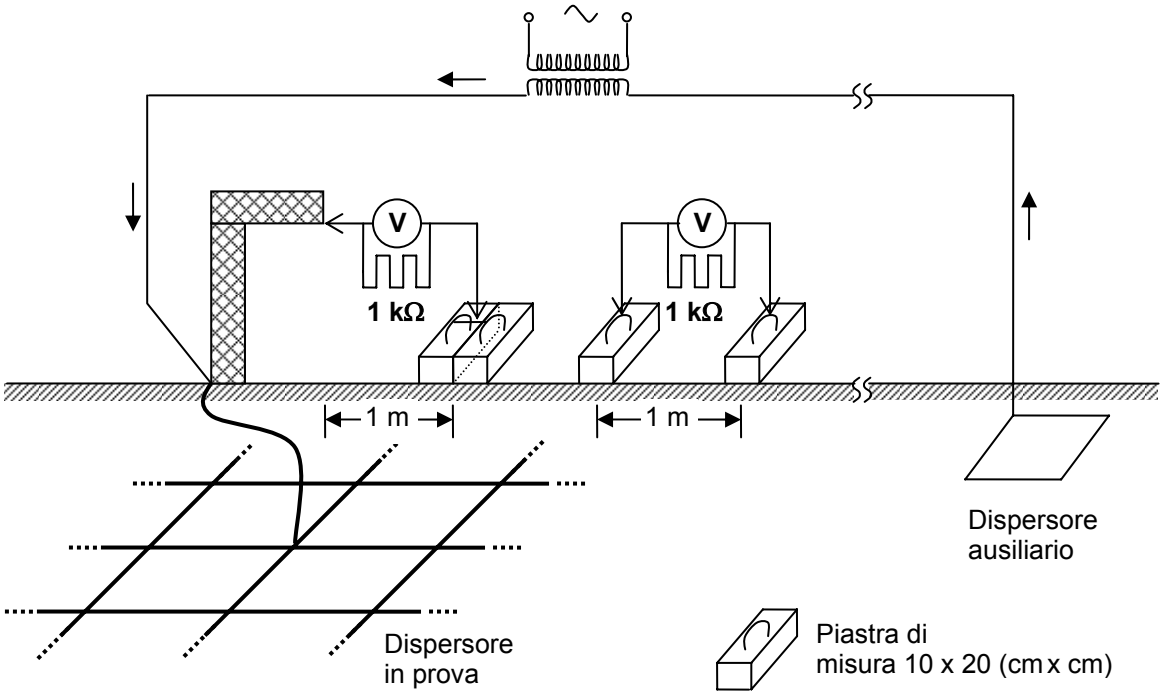


Fig. 4.1

fase di progetto non è più conveniente fare riferimento, a favore della sicurezza, ai valori assunti dalle tensioni pericolose (di contatto e di passo) a vuoto, in quanto si avrebbe come risultato un sovradimensionamento eccessivo e non giustificato del dispersore; per un più corretto dimensionamento del dispersore occorre invece riferirsi ai valori effettivi di tali tensioni valutati simulando la presenza dell'uomo nel campo di corrente creato nel mezzo dal dispersore.

Nel seguito vengono presentati due differenti metodi di simulazione dell'uomo ai fini della valutazione delle tensioni di contatto e di passo effettive. Il primo, chiamato metodo matriciale, implementato al calcolatore consente di ricavare punto per punto le tensioni di contatto e di passo effettive per una assegnata configurazione del dispersore, comunque complesso, chiamato a disperdere una data corrente di guasto a terra in un terreno omogeneo di resistività nota. Il secondo, detto metodo delle equazioni globali, consente invece di formulare delle espressioni analitiche di validità generale dei fattori di riduzione delle tensioni di contatto e di passo effettive rispetto a quelle a vuoto; noti i valori a vuoto delle tensioni pericolose, ottenuti ad esempio mediante programma di calcolo oppure utilizzando abachi o formule analitiche approssimate, tali fattori di riduzione consentono di pervenire facilmente ai rispettivi valori effettivi.

4.2 SIMULAZIONE DELL'UOMO

Facendo riferimento alle modalità di misura delle tensioni di contatto e di passo raffigurate in Fig. 33, è possibile studiare il comportamento di un dispersore di terra in presenza dell'uomo applicando le metodologie di calcolo dei dispersori complessi precedentemente illustrate.

In particolare, ai fini della valutazione delle tensioni di contatto la presenza dell'uomo nel campo di corrente creato nel mezzo dal dispersore può essere simulata a mezzo di due griglie superficiali di dimensioni 10x20 (cmxcm), poste una accanto all'altra e collegate al dispersore a mezzo di una resistenza (R_u) di valore pari alla resistenza del corpo umano (Fig. 4.2-a). Per la valutazione delle tensioni di passo, invece, l'uomo può simulato considerando le due griglie superficiali a 1 m di distanza l'una dall'altra e collegate tra loro mediante la stessa resistenza R_u (Fig. 4.2-b).

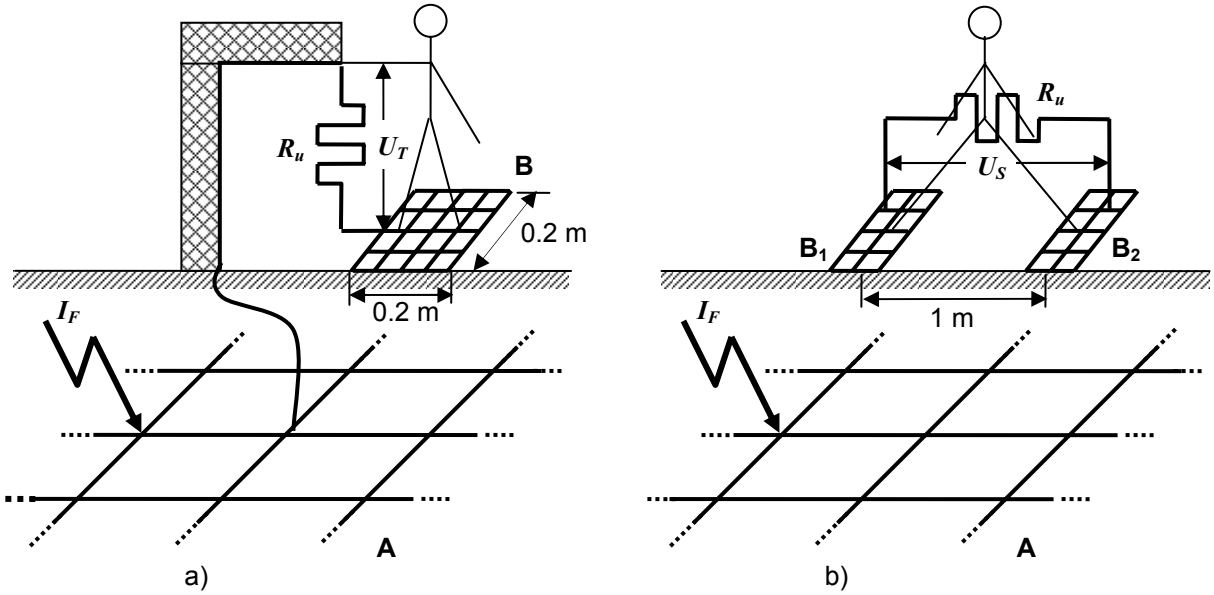


Fig. 4.2

4.3 METODO MATRICIALE

4.3.1 Valutazione delle tensioni di contatto U_T

Con riferimento alla metodologia di studio dell'interferenza conduttiva tra elettrodi di terra vista in precedenza, il sistema di Fig 4.2-a) può essere trattato come uno dei casi tipici prima studiati, ovvero il caso di *elettrodi metallicamente collegati all'elettrodo disperdente* (§ 3.4.5).

Con le solite notazioni precedentemente adottate, pertanto può essere scritto il seguente sistema di equazioni:

- equazioni di campo

$$[\boldsymbol{V}] = [\boldsymbol{R}] \cdot [\boldsymbol{I}]$$

- relazioni ausiliarie

$$\sum_i I_i^{(A)} + \sum_i I_i^{(B)} = I_F$$

$$V_A - V_B = R_u \cdot (I_F - \Sigma_i I_i^{(A)}) = \mathbf{U_T}$$

- ipotesi di equipotenzialità

$$V_i^{(A)} = V_A$$

$$V_i^{(B)} = V_B$$

Risolvendo tale sistema di equazioni, è possibile in tal modo ricavare la tensione di contatto U_T, data dalla differenza dei potenziali V_A e V_B ovvero dalla caduta di tensione ai capi della resistenza R_u.

Da notare che la tensione di contatto così ottenuta è relativa al punto sulla superficie del terreno in cui sono state supposte posizionate le griglie di misura. Volendo ricavare la tensione di contatto in un punto diverso occorre riposizionare le griglie, riscrivere il sistema di equazioni (in quanto cambiano i coefficienti di potenziale mutuo tra gli elettrodi A e B nella formazione della matrice R) e risolvere nuovamente il sistema di equazioni. Implementando la suddetta metodologia in un programma di calcolo, tuttavia tale procedura può essere automatizzata in modo da ottenere direttamente i valori delle tensioni di contatto lungo una o più assegnate direzioni di misura.

Per il dispersore di Fig. 4.3, a scopo di esempio, sono riportati in Fig. 4.4 i valori delle tensioni di contatto U_T, in percento della tensione totale di terra, calcolate lungo la direzione segnata x per diversi

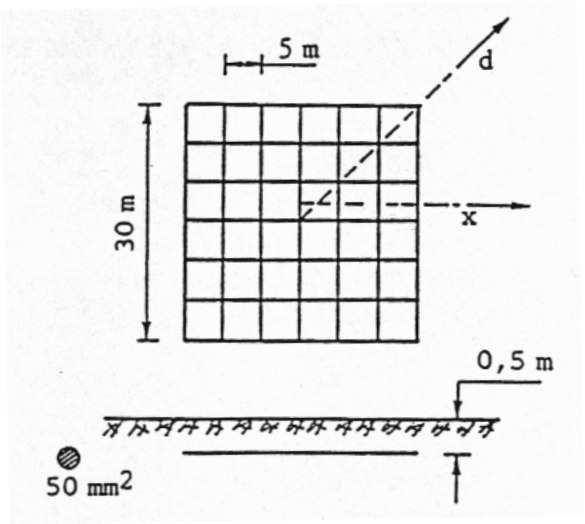


Fig. 4.3

valori della resistività del terreno ospitane. Per confronto, nella stessa figura è riportato (in tratteggio) l'andamento delle tensioni di contatto a vuoto U_{ST}%, valutate in assenza dell'uomo (in pratica ponendo R_u di valore infinito).

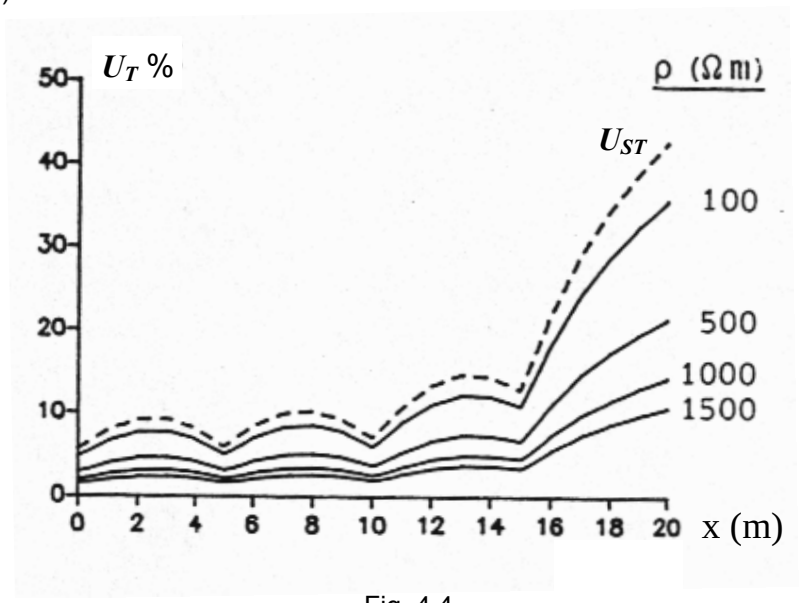


Fig. 4.4

4.3.2 Valutazione delle tensioni di passo U_S

Anche il sistema di Fig 4.2-b) rientra in uno dei casi tipici trattati in precedenza nello studio dell'interferenza conduttiva tra elettrodi di terra, ovvero il caso di *elettrodi inerti metallicamente collegati tra loro* (§ 3.4.2).

Con le solite notazioni, pertanto può essere scritto il seguente sistema di equazioni:

- equazioni di campo

$$[\boldsymbol{V}] = [\boldsymbol{R}] \cdot [\boldsymbol{I}]$$

- relazioni ausiliarie

$$\sum_{i=1}^{n} I_i^{(A)} = I_F$$

$$\sum_i I_i^{(B1)} + \sum_i I_i^{(B2)} = 0$$

$$V_{B1} - V_{B2} = R_u \cdot \sum_i I_i^{(B1)} = U_S$$

- ipotesi di equipotenzialità

$$V_i^{(A)} = V_A$$

$$V_i^{(B1)} = V_{B1}; \qquad V_i^{(B2)} = V_{B2}$$

Risolvendo il sistema di equazioni, è possibile in tal modo ricavare la tensione di passo U_S data dalla differenza del potenziale assunto dalle due griglie (V_{B1} e V_{B2}), ovvero dalla caduta di tensione ai capi di R_u. Anche in questo caso la tensione di passo così ottenuta si riferisce ai punti sulla superficie del terreno in cui sono state supposte posizionate le due griglie di misura. Volendo ricavare la tensione di passo in un altro punto, occorre pertanto ripetere nuovamente la procedura di calcolo riposizionando diversamente le due griglie. Ugualmente al calcolo delle tensioni di contatto, è possibile all'interno di

un programma di calcolo predisporre una procedura automatica per la valutazione delle tensioni di passo lungo una o più direzioni di misura assegnate.

Per lo stesso dispersore di Fig. 4.3, sono riportati in Fig. 4.4 i valori delle tensioni di passo U_S, in percento della tensione totale di terra, calcolate esternamente al perimetro del dispersore lungo la direzione diagonale d per diversi valori della resistività del terreno. A scopo di confronto, nella stessa figura è riportato (in tratteggio) l'andamento delle tensioni di passo a vuoto U_{SS}%, valutate in assenza dell'uomo (R_u = ∞).

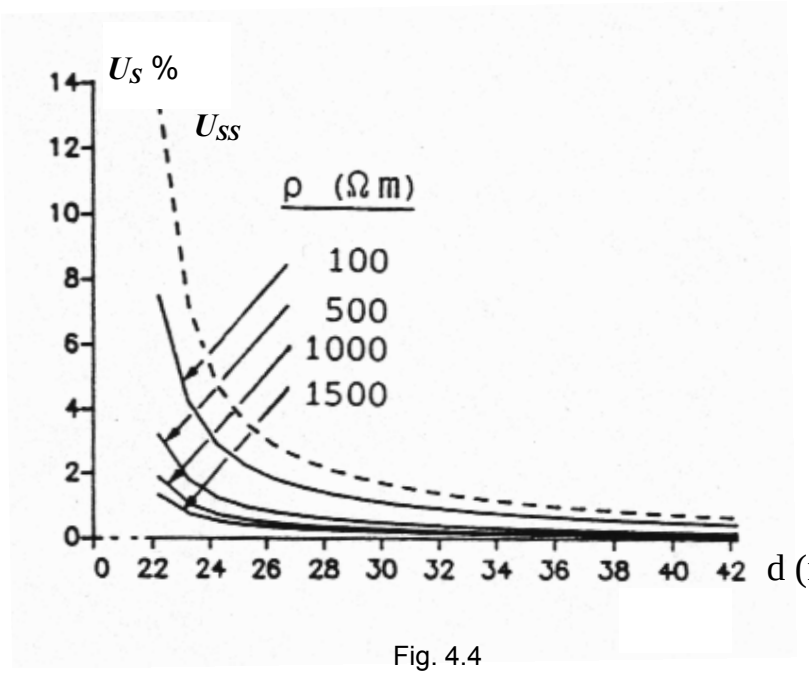


Fig. 4.4

4.3.3 Effetto di pavimentazioni isolanti

A volte in dipendenza dell'elevata corrente di guasto a terra, della limitata estensione dell'area su cui realizzare il dispersore e dell'elevata resistività del terreno, il solo dispersore, quantunque a maglie fitte e con aggiunta di picchetti, non è in grado di contenere le tensioni pericolose al di sotto dei limiti imposti dalle Norme. In questi casi una soluzione può essere quella di realizzare in tutta l'area interessata dal guasto una pavimentazione sufficientemente isolante, utilizzando a tal fine materiali con elevatissimo valore di resistività, quale ad esempio uno strato superficiale in conglomerato bituminoso o un massetto di ghiaia o pietrisco di adeguato spessore. In tal caso, la simulazione dell'uomo nel campo di corrente creato dal dispersore nel mezzo risulta indispensabile per potere valutare gli effetti della pavimentazione isolante sulle effettive tensioni di contatto e di passo applicate alla persona.

Si consideri ad esempio il dispersore di Fig. 4.5, il quale non riesce a garantire le condizioni di sicurezza nel terreno originario di posa di elevata resistività. La curva *a* di Fig. 4.6 mostra l'andamento della tensione di contatto nella direzione diagonale. Come rimedio può realizzarsi una pavimentazione isolante, ad esempio uno strato di conglomerato bituminoso con resistività di 400 kΩ·m. Se ci si limita a studiare il campo indisturbato (cioè senza la presenza dell'uomo) o a effettuare le misure con voltmetro di impedenza infinita, si rilevano riduzioni della tensione di contatto modeste, assolutamente inferiori alle aspettative (curva *b* di Fig. 4.6). E' necessario invece simulare la presenza dell'uomo per

ottenere risultati attendibili (curva *c*); ciò perché la riduzione delle tensioni pericolose dipende fisicamente non tanto dal rapporto tra le resistività dei due strati del mezzo, quanto dalla alterazione del campo provocata dalla corrente che percorre il corpo umano e che fluisce nel terreno attraverso i piedi e, nel caso in esame, interessando lo strato di pavimentazione isolante.

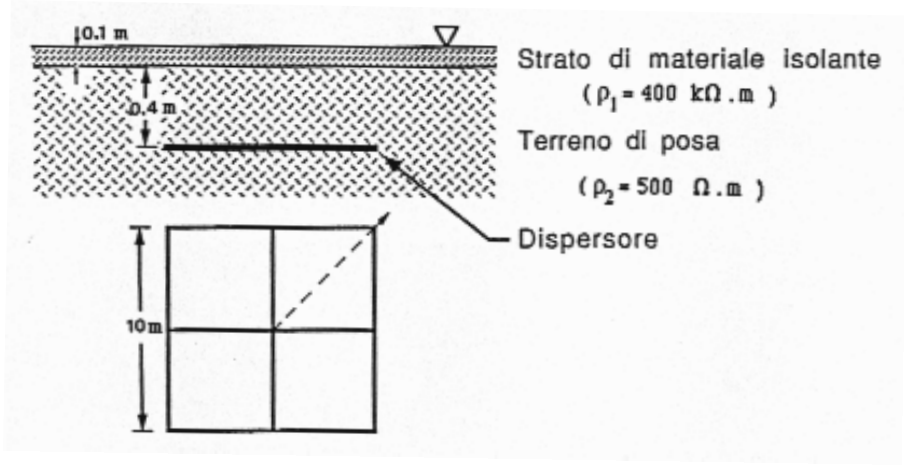


Fig. 4.5

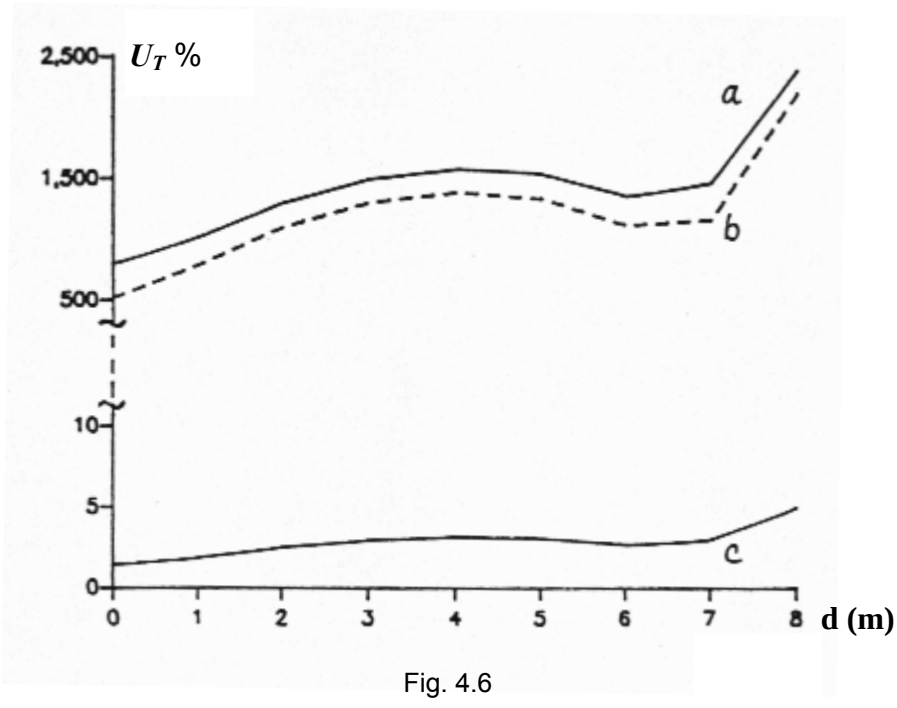


Fig. 4.6

4.3.4 Fattori di riduzione delle tensioni di contatto e di passo

Dai grafici riportati nelle Figg. 4.5 e 5.6 risulta evidente la riduzione delle tensioni pericolose applicate ad una persona per la presenza stessa del corpo umano nel campo di corrente creato dal dispersore nel terreno. Come già sottolineato più volte, tale riduzione è tanto maggiore quanto più elevata è la resistività del terreno.

Appare significativo a questo punto introdurre, rispettivamente per le tensioni di contatto e di passo, i due fattori di riduzione S_T ed S_S così definiti:

$$S_T\% = 100\frac{U_{ST} - U_T}{U_{ST}} \qquad (4.1)$$

$$S_S\% = 100\frac{U_{SS} - U_S}{U_{SS}} \qquad (4.2)$$

Valutando punto per punto i suddetti fattori di riduzione utilizzando i grafici di Figg. 4.5 e 5.6, è possibile verificare che, a parità di ρ, essi assumono valori pressoché costanti, così come mostrato nelle Figg. 4.7 e 4.8. Ciò significa che, considerando la presenza dell'uomo, la riduzione delle tensioni pericolose non dipende dal punto in cui esse vengono valutate, dipendendo soltanto dalla resistività del terreno. In un terreno non omogeneo a due strati con lo spessore del primo strato non inferiore a 5 m, è possibile inoltre dimostrare che i due fattori dipendono dalla resistività solo del primo strato. Infine, come già noto, si evidenzia come il fattore di riduzione delle tensioni di passo S_S sia più elevato, a parità di ρ, di quello delle tensioni di contatto S_T.

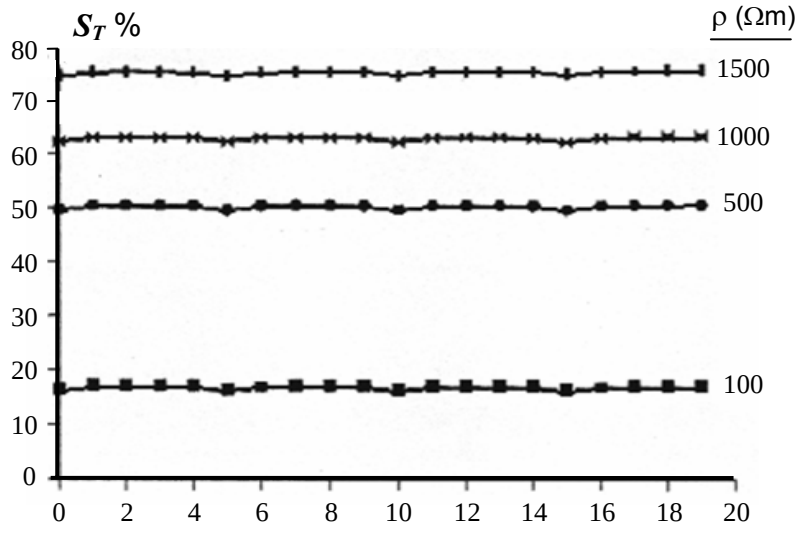


Fig. 4.7

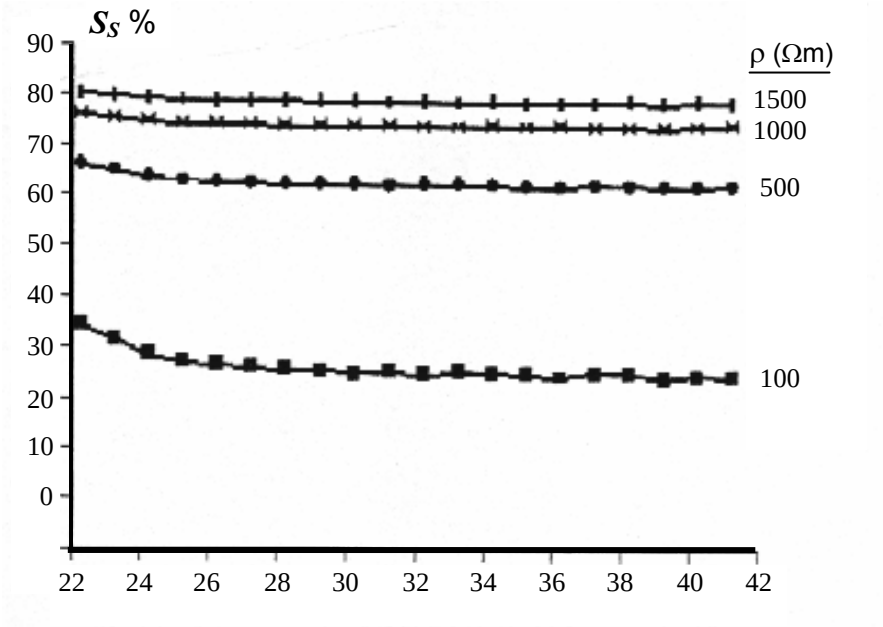


Fig. 4.8

4.4. METODO DELLE EQUAZIONI GLOBALI

4.4.1 Fattore di riduzione delle tensioni di contatto

Facendo nuovamente riferimento al sistema di Fig. 4.2-a) e ai parametri globali dei due elettrodi rappresentati, è possibile scrivere le relazioni tra le grandezze elettriche che interessano gli elettrodi in termini di equazioni globali, applicando il principio di sovrapposizione degli effetti, come segue:

$$V_A = R_A I_A + R_{AB} I_B \tag{4.3}$$

$$V_B = R_{AB} I_A + R_B I_B \tag{4.4}$$

in cui V_A e V_B rappresentano i potenziali assunti dai due elettrodi, I_A e I_B indicano le rispettive correnti complessivamente scambiate con il terreno, R_A e R_B sono le resistenze di terra proprie e R_{AB} è la *resistenza di trasferimento* tra i due elettrodi.

Alle precedenti equazioni va aggiunta la relazione tra i potenziali dei due elettrodi, la quale definisce la tensione di contatto U_T, e la relazione tra le correnti:

$$U_T = V_A - V_B = R_u I_B \tag{4.5}$$

$$I_A + I_B = I_F \tag{4.6}$$

da cui si ottengono, rispettivamente:

$$I_B = \frac{U_T}{R_u} \tag{4.7}$$

$$I_A = I_F - I_B = I_F - \frac{U_T}{R_u} \tag{4.8}$$

Sostituendo la (4.3) e la (4.4) nella prima parte dell'espressione (4.5), tenendo conto delle (4.7) e (4.8), si ha:

$$\begin{aligned} U_T = V_A - V_B &= R_A I_A + R_{AB} I_B - R_{AB} I_A - R_B I_B = \\ &= R_A I_F - R_A \frac{U_T}{R_u} + R_{AB} \frac{U_T}{R_u} - R_{AB} I_F + R_{AB} \frac{U_T}{R_u} - R_B \frac{U_T}{R_u} \end{aligned}$$

da cui si ottiene:

$$U_T = \frac{R_u (R_A - R_{AB})}{R_u + R_A + R_B - 2R_{AB}} I_F \tag{4.9}$$

La tensione di contatto a vuoto può essere espressa anch'essa come differenza tra i potenziali V_A^* e V_B^* valutati nel campo indisturbato dalla presenza dell'uomo, ossia senza il collegamento a mezzo della R_u tra gli elettrodi A e B di Fig. 34-a). In tal caso I_A coincide con I_F, per cui

$$V_A^* = R_A I_F \qquad ; \qquad V_B^* = R_{AB} I_F$$

e quindi:

$$U_{ST} = V_A^* - V_B^* = (R_A - R_{AB}) I_F \tag{4.10}$$

Sostituendo la (4.9) e la (4.10) nella espressione (4.1) del fattore di riduzione delle tensioni di contatto, si ha:

$$S_T\% = 100\left(1 - \frac{U_T}{U_{ST}}\right) = 100\left(1 - \frac{R_u}{R_u + R_A + R_{\mathbf{B}} - 2R_{AB}}\right) = 100\,\frac{R_A + R_{\mathbf{B}} - 2R_{AB}}{R_u + R_A + R_{\mathbf{B}} - 2R_{AB}}$$

La resistenza R_A ha certamente un valore di gran lunga inferiore a quello della resistenza R_B, considerando che l'elettrodo B ha dimensioni piccolissime (20x20 cm^2) e per di più è posto sulla in superficie, mentre l'elettrodo A rappresenta un dispersore che può avere dimensioni dell'ordine di diverse decine di metri di lato ed è interrato ad una certa profondità. Si ha dunque R_A << R_B e ancor di più R_A - $2R_{AB}$ << R_B; per cui, nell'espressione precedente si può trascurare il termine R_A - $2R_{AB}$ rispetto a R_B ottenendo:

$$S_T\% \approx 100\,\frac{R_{\mathbf{B}}}{R_u + R_{\mathbf{B}}} = 100\,\frac{1}{1 + \dfrac{R_u}{R_{\mathbf{B}}}}$$

Inoltre, valutando mediante programma di calcolo la resistenza di terra di un dispersore a maglie delle dimensioni dell'elettrodo B, posto sulla superficie di un terreno omogeneo di resistività ρ, si ricava:

$$R_B \approx 2\rho$$

Pertanto, per il fattore di riduzione delle tensioni di contatto si ricava infine la seguente espressione generale di facile impiego:

$$\boldsymbol{S_T\% = 100\,\frac{1}{1 + 0{,}5\,\dfrac{R_u}{\rho}}} \qquad (4.11)$$

4.4.2 Fattore di riduzione delle tensioni di passo

Facendo riferimento adesso al sistema di Fig. 4.2-b), le relazioni analitiche globali tra le grandezze elettriche del dispersore principale A e delle due griglie di misura delle tensioni di passo, applicando il principio di sovrapposizione degli effetti, sono le seguenti:

$$V_A = R_A I_A + R_{A1} I_{B1} + R_{A2} I_{B2} \qquad (4.12)$$

$$V_{B1} = R_{A1} I_A + R_b I_{B1} + R_{12} I_{B2} \qquad (4.13)$$

$$V_{B2} = R_{A2} I_A + R_{12} I_{B1} + R_b I_{B2} \qquad (4.14)$$

dove R_b e R_{12} sono, rispettivamente, la resistenza di terra di ciascuna griglia di misura e la *resistenza di trasferimento* tra le due griglie, mentre R_{A1} e R_{A2} sono le *resistenze di trasferimento* tra il dispersore principale e le griglie di misura.

Alle precedenti equazioni va aggiunta la relazione tra i potenziali delle due griglie di misura, che definisce la tensione di passo U_S, e la relazione tra le correnti:

$$U_S = V_{B1} - V_{B2} = R_u I_{B2} \qquad (4.15)$$

$$I_{B1} + I_{B2} = 0 \tag{4.16}$$

da cui si ottiene:

$$I_{B2} = \frac{U_S}{R_u} \tag{4.17}$$

$$I_{B1} = -I_{B2} = -\frac{U_S}{R_u} \tag{4.18}$$

Sostituendo la (4.13) e la (4.14) nella prima parte dell'espressione (4.12), tenendo conto delle (4.17) e (4.18), si ha:

$$U_S = V_{B1} - V_{B2} = (R_{A1} - R_{A2})I_A + (R_b - R_{12})I_{B1} - (R_b - R_{12})I_{B2} =$$
$$= (R_{A1} - R_{A2})I_A - (R_b - R_{12})\frac{U_S}{R_u} - (R_b - R_{12})\frac{U_T}{R_u}$$

da cui si ottiene:

$$U_S = \frac{R_u(R_{A1} - R_{A2})}{R_u + 2(R_b - R_{12})} I_A \tag{4.19}$$

La tensione di passo a vuoto può essere espressa anch'essa come differenza tra i potenziali V_{B1}^* e V_{B2}^* valutati nel campo indisturbato dalla presenza dell'uomo, ossia senza il collegamento a mezzo della R_u tra i due elettrodi B1 e B2 di Fig. 4.2-b). Si ha:

$$V_{B1}^* = R_{A1} I_A \quad ; \quad V_{B2}^* = R_{A2} I_A$$

per cui:

$$U_{SS} = V_{B1}^* - V_{B2}^* = (R_{A1} - R_{A2})I_A \tag{4.20}$$

Sostituendo la (4.19) e la (4.20) nella espressione (4.2) del fattore di riduzione delle tensioni di passo, si ha:

$$S_S\% = 100\left(1 - \frac{U_S}{U_{SS}}\right) = 100\left(1 - \frac{R_u}{R_u + 2(R_b - R_{12})}\right) = 100\,\frac{2(R_b - R_{12})}{R_u + 2(R_b - R_{12})}$$

Valutando mediante programma di calcolo la resistenza di terra di un dispersore a maglie delle dimensioni di una griglia di misura e la resistenza di trasferimento tra le due griglie nelle condizioni rappresentate in Fig. 4.2-b), supposto il terreno omogeneo di resistività ρ, si ottiene:

$$R_b \approx 2{,}675\rho \quad ; \quad R_{12} \approx 0{,}161\rho$$

per cui risulta: $2(R_b - R_{12}) \approx 5\rho$.

Pertanto, anche per il fattore di riduzione delle tensioni di passo si ricava la seguente espressione generale di facile impiego:

$$\boldsymbol{S_S\% = 100\,\frac{1}{1 + 0{,}2\,\frac{R_u}{\rho}}} \tag{4.21}$$

4.4.3 Conclusioni

Nella fase di progetto di un dispersore di terra, si possono utilizzare i programmi di calcolo, gli abachi e le espressioni analitiche approssimate disponibili a questo scopo, al fine di determinare i valori delle tensioni pericolose a vuoto, e quindi applicare i fattori di riduzione sopra definiti per tenere conto della presenza dell'uomo nel campo di corrente.

L'esame delle espressioni dei fattori di riduzione permette di trarre le seguenti conclusioni, a conferma di quanto già anticipato alla fine del § 4.3.4:

- in terreno omogeneo i valori assunti dai fattori di riduzione possono ritenersi costanti al variare della posizione del punto di misura, sia all'interno che all'esterno del perimetro del dispersore;
- gli stessi fattori di riduzione possono ritenersi indipendenti dalla forma e dalle dimensioni del dispersore; i loro valori dipendono principalmente dalla resistività ρ del mezzo e dal valore della resistenza R_u impiegata per simulare il corpo umano.

Infine, per quanto detto in § 4.3.4, in un terreno non omogeneo a due strati con lo spessore del primo strato non inferiore a 5 m i due fattori dipendono dalla resistività solo del primo strato con la stessa legge del terreno omogeneo.

CAPITOLO 5

DRENAGGIO DELLA CORRENTE DI GUASTO A TERRA DA PARTE DI GUAINE METALLICHE DI CAVI O FUNI DI GUARDIA

5.1 INTRODUZIONE

Nelle sottostazioni di trasformazione A.T. l'obiettivo di limitare le tensioni di contatto e di passo, a seguito di un guasto monofase a terra, ai valori imposti dalle Norme diviene sempre più difficile per i sempre crescenti livelli delle correnti di guasto a terra nei nodi delle reti e per la necessità di vincolare ad aree sempre più limitate la realizzazione delle stazioni e dei rispettivi impianti di terra.

E' possibile tuttavia alleggerire i compiti che è chiamato ad assolvere il dispersore principale della stazione sede del guasto e conseguire un dimensionamento più razionale ed economico, sfruttando tutti i circuiti metallici che possono drenare verso la stazione di alimentazione una parte della corrente di guasto, sottraendola localmente al dispersore. Essi sono:

- le funi di guardia delle linee aeree (Fig. 5.1) e le guaine metalliche dei cavi (Fig. 5.2) degli elettrodotti A.T. che alimentano il guasto, collegate al dispersore della stazione di arrivo e a quello della stazione di alimentazione a monte il cui centro stella del trasformatore è a terra (*circuiti di ritorno*);
- gli stessi elementi relativi alle linee in uscita dalla sottostazione sede del guasto, le che non alimentano il guasto (*dispersori ausiliari*).

Da tale drenaggio può derivare una riduzione non trascurabile della tensione totale di terra e delle tensioni pericolose nelle zone interessate al guasto, sia in stazione che in linea.

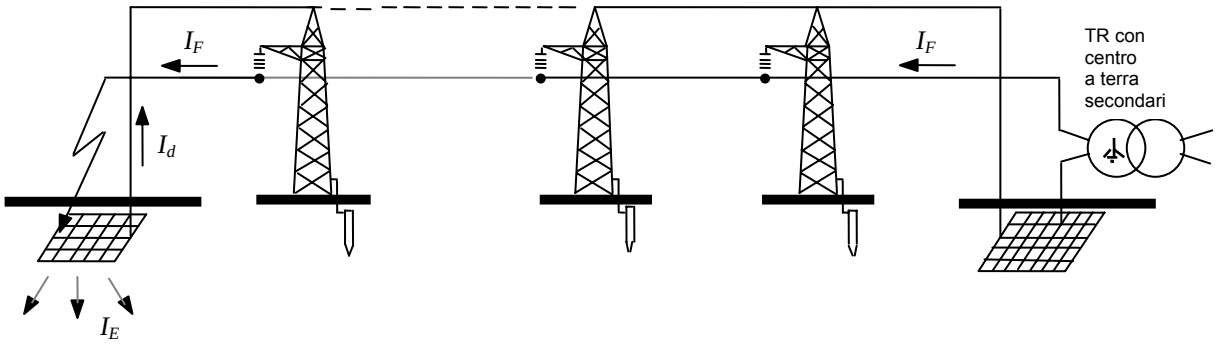


Fig. 5.1

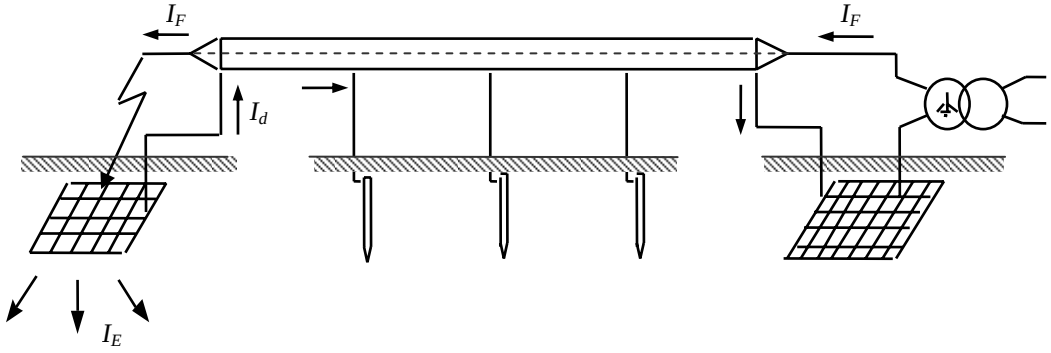


Fig. 5.2

D'altra parte le Norme fanno distinzione tra "corrente di guasto a terra" (I_F) e "corrente di terra" (I_E), quest'ultima definita come una quota parte della corrente di guasto a terra che l'impianto di terra è chiamato a disperdere nel terreno.

Pertanto, un aspetto molto importante nel progetto dell'impianto di terra di una stazione è il calcolo preliminare della distribuzione della corrente di guasto a terra tra il dispersore di stazione, i circuiti di ritorno e i dispersori ausiliari. In tal modo, il dispersore di stazione potrà essere dimensionato, in modo più razionale ed economico, rispetto al valore della effettiva corrente di terra I_E che esso sarà chiamato a disperdere, e non rispetto al valore complessivo della corrente di guasto a terra prevista in stazione I_F.

In pratica, però, buona parte della corrente di guasto viene drenata verso l'alimentazione attraverso i circuiti di ritorno delle linee che alimentano la stazione sede del guasto, mutuamente accoppiati con i conduttori di fase. In particolare, nel caso di linea di alimentazione in cavo, costituita da una terna di cavi unipolari, gran parte della corrente di guasto in genere ritorna direttamente all'alimentazione attraverso le guaine metalliche dei cavi, poste in parallelo, a causa del forte accoppiamento induttivo che esse presentano con i conduttori di fase; mentre nel caso di linea di alimentazione aerea, la corrente drenata da parte della fune di guardia risulta molto più piccola. Il contributo al drenaggio della corrente di guasto da parte dei dispersori ausiliari delle linee in uscita dalla stazione è invece molto modesto (soprattutto se di resistenza molto più elevata rispetto alla resistenza di terra del dispersore di stazione), oltre che di difficile valutazione in considerazione dell'elevato numero di linee di media tensione che fuoriescono dalla stazione e che fanno capo ad altrettante cabine MT/BT; pertanto, in fase di progetto normalmente tale contributo viene trascurato, essendo ciò comunque a favore della sicurezza.

Nel seguito vengono presentati due metodi di approccio teorico al problema di come si ripartisce la corrente di guasto a terra tra il dispersore di stazione e i circuiti di ritorno di linee che alimentano il guasto o i dispersori ausiliari di linee che non alimentano il guasto.

5.2 LINEA CHE ALIMENTA IL GUASTO

Per la valutazione del drenaggio della corrente di guasto a terra in stazione offerto dai circuiti di ritorno delle linee che alimentano il guasto si può fare riferimento allo schema equivalente unifilare di Fig. 5.3, rappresentante una tratta di linea aerea o in cavo (supposta costituita da tre cavi unipolari) tra la stazione sede del guasto e quella di alimentazione. A favore della sicurezza, e per semplicità, si trascurano le messe a terra intermedie in corrispondenza dei tralicci (nel caso di linea aerea) o delle sezioni di cross-bonding (se la linea è in cavo).

Il significato dei simboli utilizzati Fig. 5.3 è il seguente:

I_F : corrente di guasto monofase a terra sulla linea (aerea o in cavo);

I_d : aliquota della corrente di guasto drenata direttamente verso la stazione di alimentazione complessivamente dalla fune di guardia o dalle guaine metalliche dei cavi;

I_E : aliquota della corrente di guasto che interessa direttamente l'impianto di terra della stazione sede del guasto;

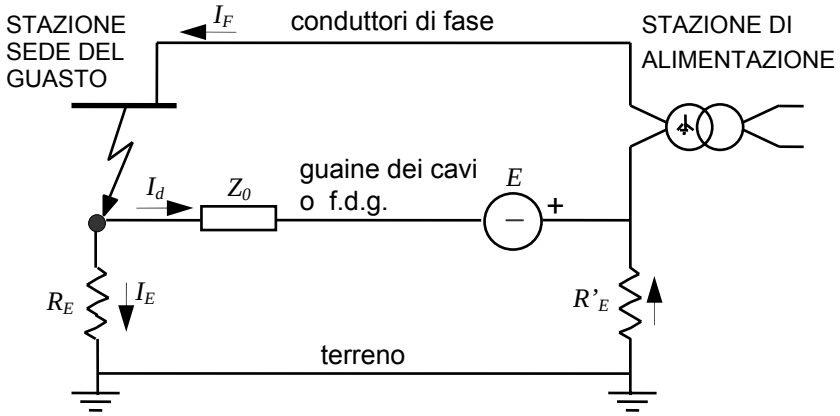


Fig. 5.3

Z_0 : impedenza omopolare propria della fune di guardia, ovvero parallelo delle impedenze omopolari di ciascuna guaina dei cavi;

E : forza elettromotrice indotta dai conduttori di fase sulla fune di guardia o sulle guaine dei cavi. Si ha: $E = Z_{cg} I_F$

essendo Z_{cg} l'impedenza mutua tra fune di guardia o guaine dei cavi e conduttori di fase;

R_E, R'_E: resistenza di terra rispettivamente della stazione sede del guasto e di quella di alimentazione.

Scrivendo l'equazione di Kirchhoff alla maglia per il circuito di Fig. 5.3 si ha:

$$(R_E + R'_E)I_E + Z_{cg} I_F - Z_0 I_d = 0$$

tenendo conto che $I_E = I_F - I_d$

si ricava:

$$I_d = \frac{R_E + R'_E + Z_{cg}}{R_E + R'_E + Z_0} I_F$$

Pertanto, l'aliquota della corrente di guasto che interesserà il dispersore della stazione sede del guasto è:

$$I_E = I_F - I_d = \frac{Z_0 - Z_{cg}}{R_E + R'_E + Z_0} I_F$$

Come detto prima, le valutazioni di cui sopra sono preliminari al progetto del dispersore, per cui nella espressione precedente R_E di fatto non è noto. Ai fini del calcolo della I_E, e quindi della scelta di progetto del dispersore, si può tuttavia in questa fase ipotizzare un valore della resistenza di terra del dispersore sufficientemente piccolo e a favore della sicurezza; salvo poi a effettuare nuovamente i calcoli nel caso in cui il valore di R_E, una volta dimensionato il dispersore, dovesse risultare più piccolo di quello ipotizzato.

Con le ipotesi fatte e assumendo R_E = 1 Ω e R'_E = 0,5 Ω, per una linea in cavi unipolari ad olio fluido di sezione da *150* a *630 mm*^{2} (nelle ordinarie condizioni di posa) la corrente residua che interessa il

dispersore di terra della stazione sede del guasto, calcolata a mezzo della espressione di sopra, è limitata al *25÷30%* della totale corrente di guasto trasportata dalla linea; la restante parte della corrente di guasto (ottenuta come differenza vettoriale tra I_F e I_E) viene ricondotta all'alimentazione direttamente attraverso le guaine dei cavi.

Nel caso invece di linea aerea, la corrente che interessa il dispersore di terra della stazione sede del guasto dipende dal materiale costituente la fune di guardia. Nelle stesse ipotesi di cui sopra, in Tab. 5.1 sono riportati i valori di I_E, in percento della totale corrente di guasto, ottenibili a mezzo della espressione prima trovata, per linee aeree con una o due funi di guardia di diverso materiale.

	Acciaio	Alumoweld	Copperweld
Una fune	95,60	87,30	75,50
Due funi	90,30	74,80	56,90

Tab. 5.1

Nel caso di più linee, aeree o in cavo, che si attestano alla stazione e che alimentano il guasto, si può schematizzare ciascuna linea, e il contributo alla corrente di guasto a terra in stazione da parte di ognuna di esse, come in Fig. 5.3 e quindi calcolare l'aliquota della corrente drenata da parte della fune di guardia o delle guaine dei cavi come prima illustrato. Essendo il sistema lineare, applicando il principio di sovrapposizione degli effetti si può ricavare la corrente di terra nel dispersore della stazione sede del guasto come differenza (vettoriale) della corrente totale di guasto a terra e delle aliquote delle correnti drenate attraverso i circuiti di ritorno di ciascuna linea.

5.3 LINEA CHE NON ALIMENTA IL GUASTO

Per le linee in uscita dalla sottostazione, che non contribuiscono ad alimentare il guasto ma i cui elementi metallici (fune di guardia o guaine dei cavi) sono collegati a terra alle due estremità, vale lo schema elettrico equivalente unifilare di Fig. 5.4, anch'esso costituito da una sola cella ma priva del generatore equivalente; in tale schema R'_E rappresenta la resistenza di terra del dispersore della stazione di arrivo il quale, in questo caso, si comporta da dispersore ausiliario.

Scrivendo l'equazione di maglia è possibile ricavare la corrente drenata da parte della fune di guardia o delle guaine dei cavi verso il dispersore ausiliario.

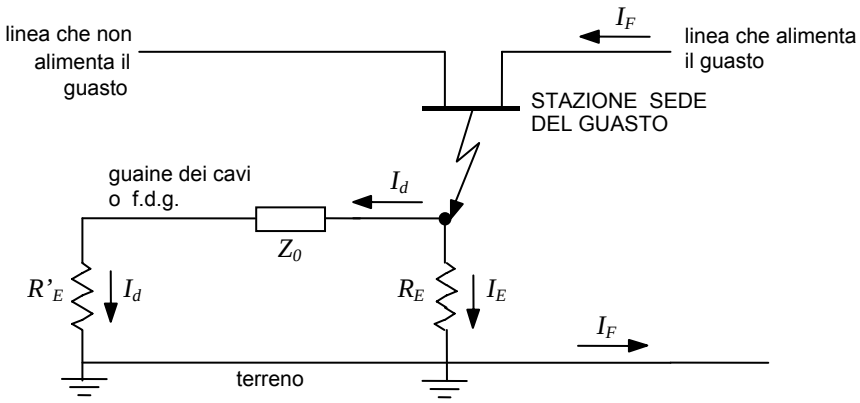


Fig. 5.4

Si ha:

$$R_E(I_F - I_d) - R'_E I_d - Z_0 I_d = 0$$

Da cui:

$$I_d = \frac{R_E}{R_E + R'_E + Z_0} I_F \qquad ; \qquad I_E = \frac{Z_0 + R'_E}{R_E + R'_E + Z_0} I_F$$

In tal caso, venendo meno il mutuo accoppiamento con i conduttori di fase che alimentano il guasto, la corrente drenata dalla fune di guardia o dalle guaine dei cavi è molto modesta, riducendosi al più a qualche percento della corrente di guasto. D'altra parte, ciò assicura che eventuali tensioni pericolose che si manifestano nella stazione AT sede del guasto non siano trasferite attraverso le linee in uscita ad altri impianti, come ad esempio le cabine MT, i cui dispersori sono solitamente collegati al dispersore della stazione di alimentazione a monte mediante schermi di cavi e/o conduttori nudi appositamente interrati insieme ai cavi.

5.4 FORMULARIO

Impedenza omopolare propria della guaina metallica di un cavo:

$$Z'_0 = R_g + 3\,\pi^2\, f\, 10^{-4} + j\,\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{(2H_T)^3}{D_m^2\, r^*_g} \qquad [\Omega/\text{km}]$$

Impedenza omopolare mutua tra guaina metallica e anima di un cavo:

$$Z_{cg} = \pi^2\, f\, 10^{-4} + j\,\omega \frac{\mu_0}{6\pi} \ln \frac{(2H_T)^3}{D_m^2\, r^*_g} \qquad [\Omega/\text{km}]$$

Impedenza omopolare propria della fune di guardia:

$$Z_0 = R_f + \pi^2\, f\, 10^{-4} + j\,\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2H_T}{0{,}78\, r_0} \qquad [\Omega/\text{km}]$$

Impedenza omopolare mutua tra fune di guardia e conduttori di fase:

$$Z_{cg} = \pi^2\, f\, 10^{-4} + j\,\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2H_T}{D_{mf}} \qquad [\Omega/\text{km}]$$

dove $2H_T = 660\sqrt{\frac{\rho_T}{f}}$

R_g : resistenza della guaina metallica del cavo per unità di lunghezza;
f : frequenza;
r^*_g : raggio medio della guaina;
ω : pulsazione;
μ_0 : permeabilità nel vuoto (= $4\cdot\pi\cdot10^{-4}$ H/km);
D_m : distanza media tra le anime dei cavi;
R_f : resistenza della fune di guardia per unità di lunghezza;
r_0 : raggio della fune di guardia;
D_{mf} : distanza media tra la fune di guardia e i conduttori di fase;
ρ_T : resistività del terreno.

CAPITOLO 6

PROTEZIONE DELLE STRUTTURE CONTRO I FULMINI

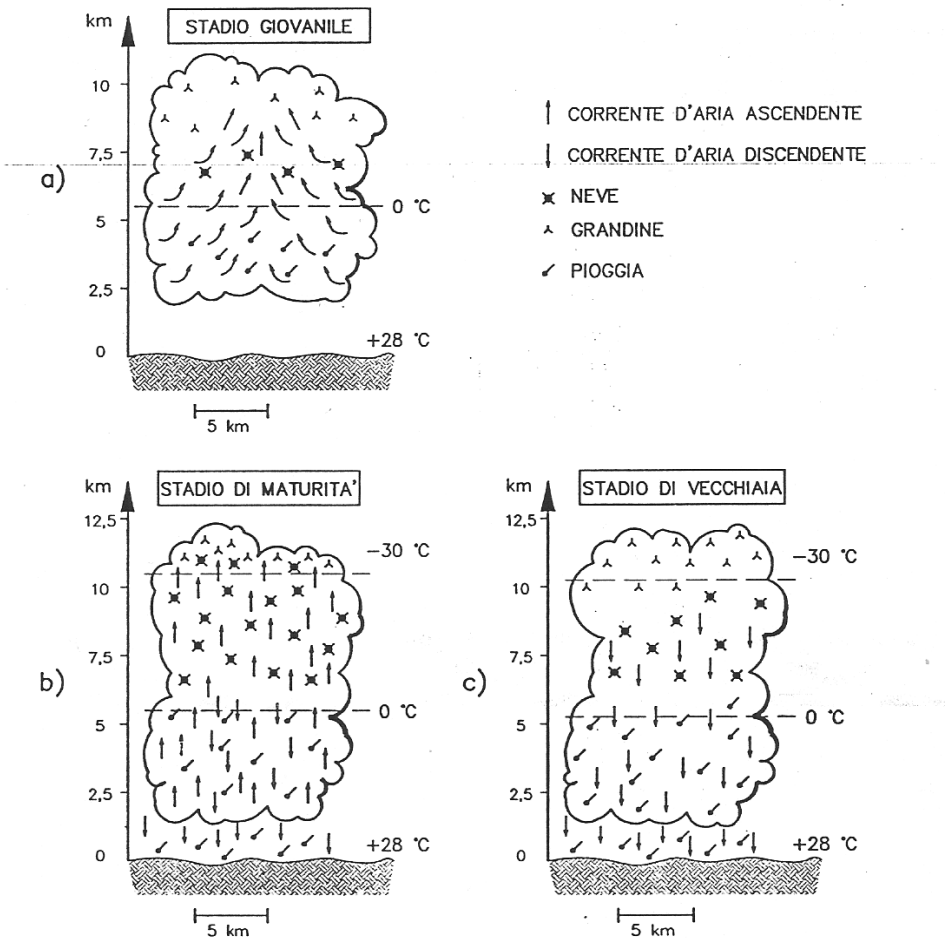
6.1 FISICA DEL TEMPORALE

6.1.1 Generalità

Un temporale si forma seguendo l'evoluzione di diversi fenomeni che portano alla nascita di una nuvola temporalesca. La presenza di una massa d'aria molto umida a stratificazione verticale instabile, con strati d'aria più caldi in basso e più freddi in alto, da luogo alla formazione di una colonna d'aria calda ascendente, che man mano che si solleva si raffredda; ad una certa altezza l'aria diventa satura di vapore acqueo, il vapore si condensa e forma la nuvola.

Il calore che si forma dalla condensazione del vapore riscalda ulteriormente l'aria ascendente, imprimendole così una nuova spinta verso l'alto; se l'aria contiene poco vapore acqueo, il fenomeno si esaurisce rapidamente con l'aumentare dell'altezza. Se l'aria è molto umida si ha la formazione di cumuli stratificati (spessore 10÷12 km, diametro circa 10 km, altezza dal suolo 2÷3 km); all'interno, se la temperature scende al di sotto di 0 °C, le goccioline d'acqua, gelando, danno luogo alla formazione di neve e ghiaccio.

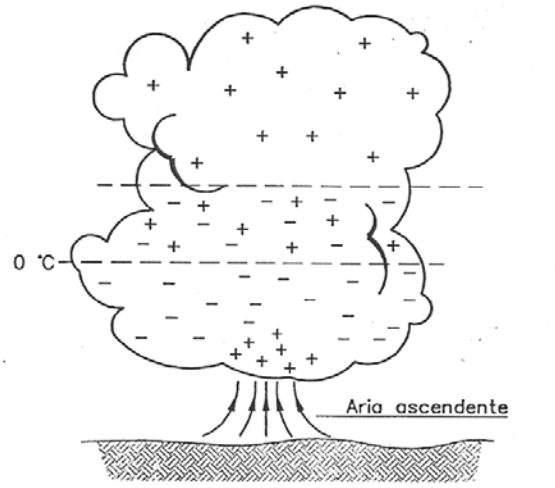
L'aria discendente, che da luogo alle precipitazioni, è causata dalle particelle (pioggia, neve, grandine) che vengono dapprima trasportate verso l'alto dall'aria calda ascendente e poi, con l'aumentare della loro quantità e grossezza, frenano l'aria calda ascendente e la trasformano in corrente d'aria discendente.



6.1.2 Formazione delle cariche

Il meccanismo microfisico di formazione della carica è legato principalmente alla presenza di minuscole particelle d'acqua e di ghiaccio e alla loro elettrizzazione per strofinio da parte della corrente d'aria ascendente. Le cariche positive, che offrono una superficie di attacco al vento relativamente più grande, sono trasportate verso l'alto dalla corrente d'aria ascendente.

In tal modo, ha origine una separazione delle cariche su larga scala con accumulo di cariche positive nella parte alta della nuvola e di cariche negative nella parte bassa. Le cariche positive e negative, dello stesso ordine di grandezza (da alcune centinaia a qualche migliaio di Coulomb), generano intensi campi elettrici non solo all'interno della nuvola, fra la zona carica positivamente e quella carica negativamente, ma anche fra nuvola e terra a causa dell'induzione di cariche di segno opposto al suolo [3].



6.2 FULMINI DISCENDENTI

La scarica elettrica che genera il fulmine può avere origine tra due ammassi di nuvole o, più comunemente, tra una nuvola e la superficie del suolo, del mare o di un lago. Il fenomeno si manifesta quando l'intensità del campo elettrico, all'interno di una nuvola o al suolo, supera la rigidità dielettrica dell'aria [4]; ciò può avvenire in prossimità di cristalli di ghiaccio aghiformi all'interno della nuvola o sulla sommità di strutture alte e snelle al suolo.

Nella scarica di un fulmine si possono individuare essenzialmente tre fasi:

a) *formazione del canale di fulmine*;

b) *formazione della controscarica*;

c) *sviluppo della scarica di ritorno*.

6.2.1 Formazione del canale di fulmine

La scarica può avere inizio nella parte inferiore della nuvola, a causa dell'intenso campo elettrico locale e della rarefazione dell'aria. Sotto l'azione del campo elettrico, la scarica si propaga verso terra assumendo la forma di un canale ramificato. Tale canale è costituito da un nucleo altamente conduttivo (diametro ≈ 1 cm) circondato, per effetto corona, da un involucro di carica spaziale il cui raggio varia fra qualche metro a qualche decina di metri e avente la stessa polarità delle cariche

---

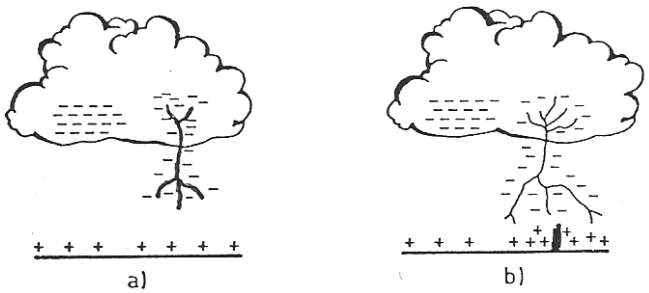
([3]) Valori tipici dell'intensità di campo elettrico sono: 0,1 kV/cm all'interno della nuvola e 0,3÷0,4 kV/cm al suolo (in presenza di una nuvola temporalesca).

([4]) La rigidità dielettrica dell'aria, che in condizioni ideali di aria pulita e asciutta è di circa 30 kV/cm, in presenza di umidità, corpuscoli e pulviscolo atmosferiche non supera di solito 4 kV/cm.

contenute nella parte inferiore della nuvola (negativa).
Il canale procede a zigzag, poiché la direzione di avanzamento è determinata dalle mutevoli condizioni locali, e per scatti successivi.

6.2.2 Formazione della controscarica

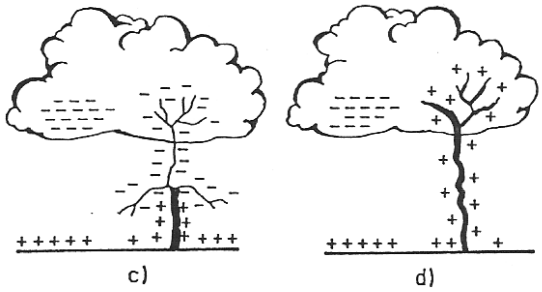
Man mano che il canale di fulmine procede verso terra, trasportando con se parte della carica elettrica originariamente situata nella nube, il campo elettrico al suolo diventa così alto da dar luogo, specie su strutture alte e snelle, a un fenomeno di tipo corona che produce una controscarica.
La controscarica si sviluppa attraverso un canale ascendente, avente in genere lunghezza di alcune decine di metri, diretto verso il canale discendente.



Formazione del canale di fulmine e della controscarica

6.2.3 Sviluppo della scarica di ritorno

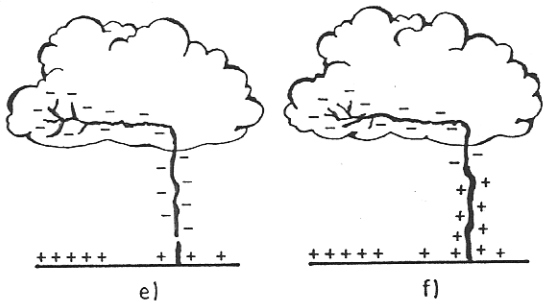
Quando il canale di fulmine incontra quello di controscarica, il punto fulminato è univocamente determinato ed ha inizio lo smaltimento a terra delle cariche depositate lungo il canale discendente (fase di "*scarica oscura*"); la corrente associata, che interessa il punto colpito al suolo, prende il nome di *corrente di fulmine*. Questo processo è accompagnato dal manifestarsi della scarica di ritorno che si propaga verso l'alto lungo il canale, con una velocità cento volte più elevata di quella della fase iniziale; la corrente di fulmine, che nel canale discendente varia da pochi ampere a qualche centinaia di ampere, durante tale fase può raggiungere valori di centinaia di migliaia di ampere [(5)].
La scarica di ritorno illumina vivamente il canale di fulmine e le sue ramificazioni e costituisce la parte visibile del fenomeno della fulminazione. L'elevata corrente riscalda e comprime l'aria interessata dal canale di fulmine per effetto elettrodinamico. Al termine, l'aria non più compressa si espande violentemente provocando un'onda d'urto che determina l'effetto acustico noto con il nome di *tuono*.



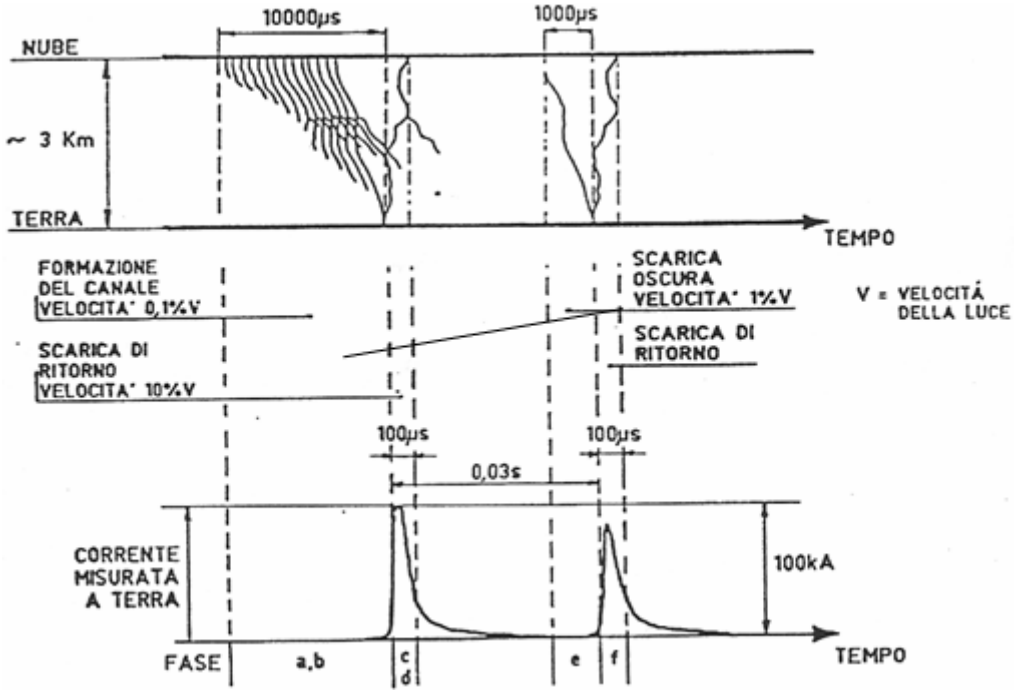
Il fenomeno può ripetersi, in quanto la carica disponibile sulla nuvola può raggiungere qualche migliaio di coulomb mentre quella portata a terra dal canale di fulmine è dell'ordine di alcuni coulomb.

([5]) Pur essendo la carica in gioco nelle due fasi la stessa (alcuni coulomb), nella prima fase la carica si abbassa dalla nube verso terra con una velocità dello 0,1% della velocità della luce, mentre nella seconda fase essa è smaltita a terra con una velocità uguale al 10÷50% di quella della luce.

La dislocazione della carica lungo il vecchio canale, rimasto ancora ionizzato, avviene questa volta senza scatti e a velocità molto più alta.



Le successive "scariche di ritorno" nel canale danno luogo ad ulteriori impulsi di corrente attraverso la struttura colpita. Quella che ad occhio nudo appare come una scarica singola in realtà può essere costituita da più scariche in rapida successione.



Fasi della scarica di un fulmine discendente

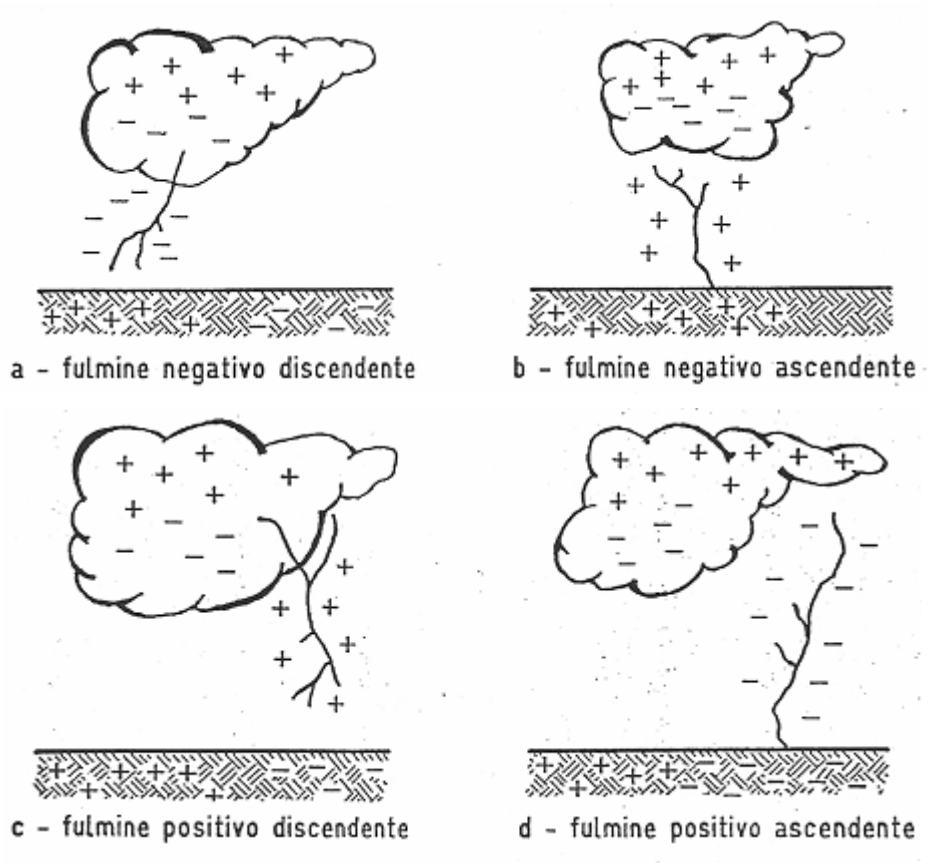
6.3 FULMINI ASCENDENTI

Il canale di fulmine, in alcuni casi, può avere origine su strutture al suolo, specie se molto alte e situate in punti dominanti del terreno, allorché, in presenza di una nuvola temporalesca, il campo elettrico su di esse supera la rigidità dielettrica dell'aria. In pratica, i fulmini ascendenti si verificano soltanto per strutture alte più di 80 m dal suolo.

6.4 POLARITA' DELLA SCARICA DI UN FULMINE

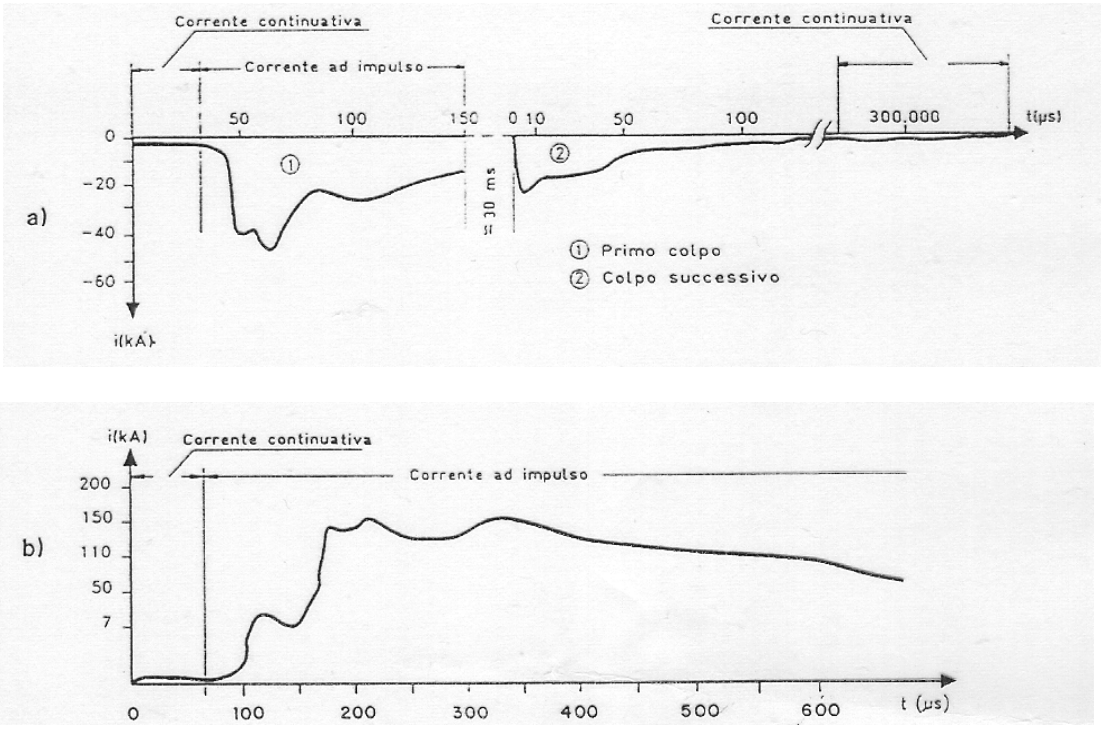
In dipendenza della polarità della carica della parte della nube interessata dallo scambio di cariche elettriche, i fulmini vengono classificati in fulmini positivi e fulmini negativi.

Contrariamente a ciò che avviene per i fulmini negativi, i fulmini positivi sono sempre caratterizzati da una sola scarica; inoltre hanno una bassissima probabilità di verificarsi in quanto presentano un percorso di scarica più lungo, dovendo essere interessata la parte alta della nuvola. Per tale motivo circa il 90% delle scariche fra nuvole e terra è di polarità negativa.


a - fulmine negativo discendente
b - fulmine negativo ascendente
c - fulmine positivo discendente
d - fulmine positivo ascendente

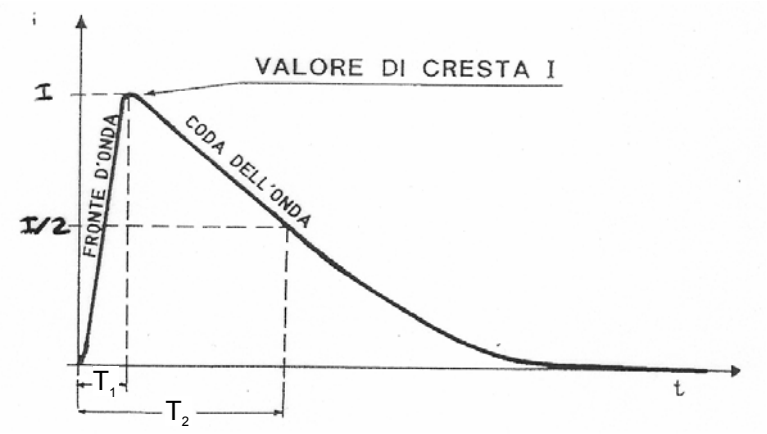
6.5 FORMA D'ONDA E PARAMETRI DELLA CORRENTE DI FULMINE

Se si considera il fulmine dall'inizio alla fine del fenomeno, si possono distinguere due componenti tipiche della corrente di fulmine, le quali si presentano singolarmente o associate in varie combinazioni: una *corrente ad impulso* e una *corrente continuativa*.



Forme d'onda tipiche della corrente di fulmine: a) fulmine negativo, b) fulmine positivo.

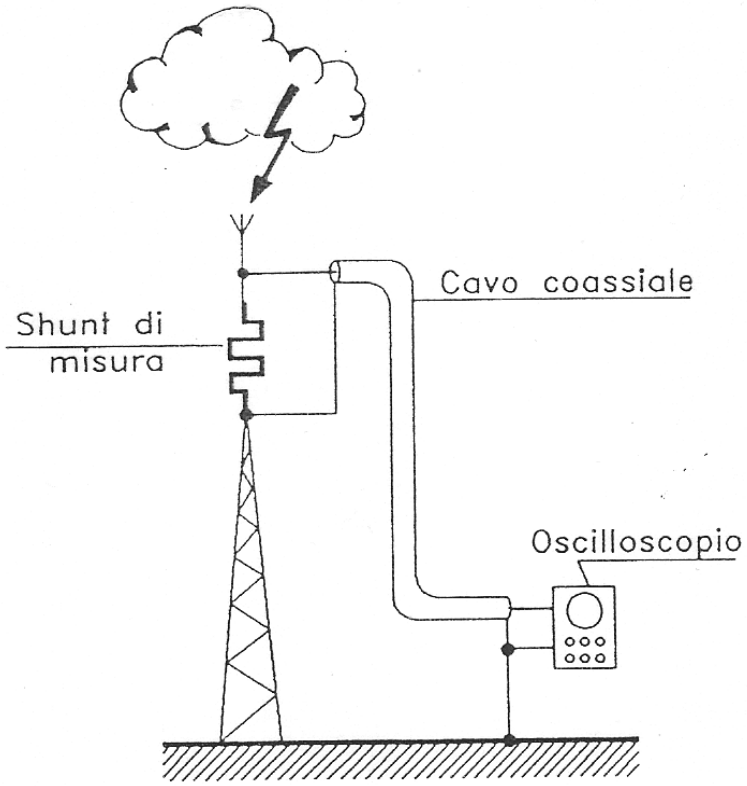
La ***corrente ad impulso*** è una corrente unidirezionale di brevissima durata, la cui forma d'onda è caratterizzata dalle seguenti grandezze: il *valore di cresta* (I); il *tempo alla cresta* (T_1); il *tempo all'emivalore* (T_2). La corrente ad impulso ha fronte ripido (0,5÷100 kA/μs), durata relativamente breve(100÷1000 μs all'emivalore) e ampiezza dell'ordine 2÷200 kA. Per valore della corrente di fulmine si intende, in genere, il valore alla cresta.



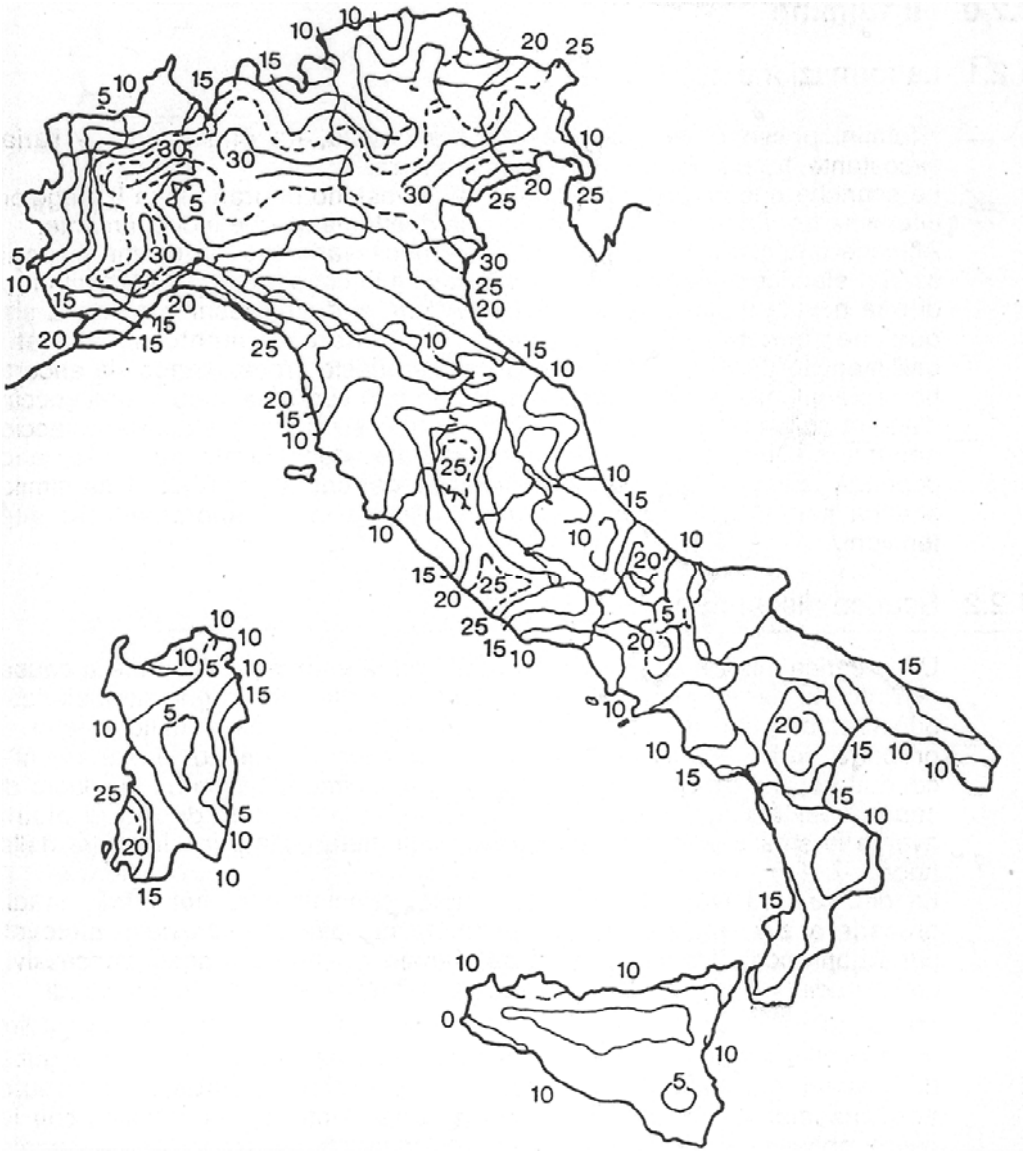
La ***corrente continuativa*** si manifesta con andamento irregolarmente piatto e si forma all'inizio del primo colpo e a volte come continuazione dell'impulso. L'ampiezza, in genere dell'ordine 10-500 A, può raggiungere eccezionalmente qualche kA per fulmini negativi e qualche decina di kA per quelli positivi.

Gli elevati valori della corrente di fulmine sono dovuti al breve tempo in cui si sviluppa il fenomeno più che alla carica complessivamente trasportata. Questa è infatti modesta: circa 20 Coulomb nei fulmini negativi (multipli) e 70 Coulomb in quelli positivi.

La rilevazione della forma d'onda della corrente di fulmine e la sua registrazione vengono effettuate da stazioni di misure oscillografiche automatiche sparse in tutto il territorio.



Sono state costruite anche le ***curve di livello ceraunico***, che rappresentano il numero di giornate temporalesche che mediamente si hanno in un determinato luogo nell'arco di un anno (durante la rilevazione ciò significa che si è udito almeno un tuono).

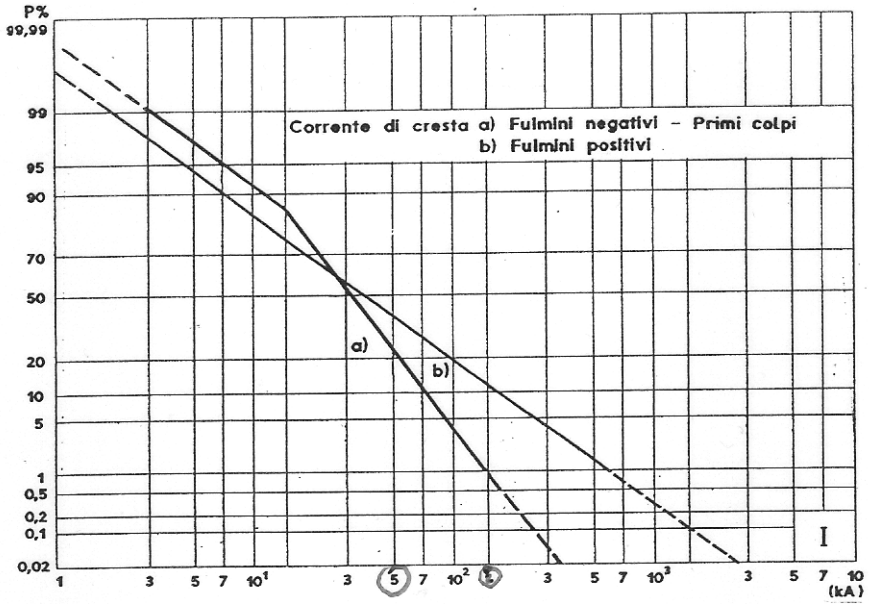


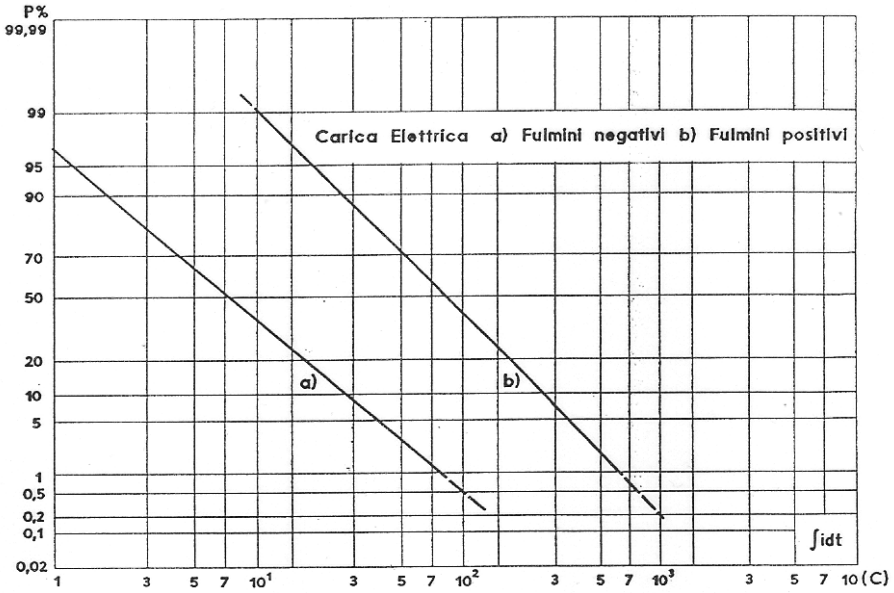
Attraverso tali rilevazioni sono stati anche definiti, in termini di distribuzione statistica, i valori dei parametri della corrente di fulmine considerati, a livello normativo, per stabilire le caratteristiche che deve avere un impianto di protezione.

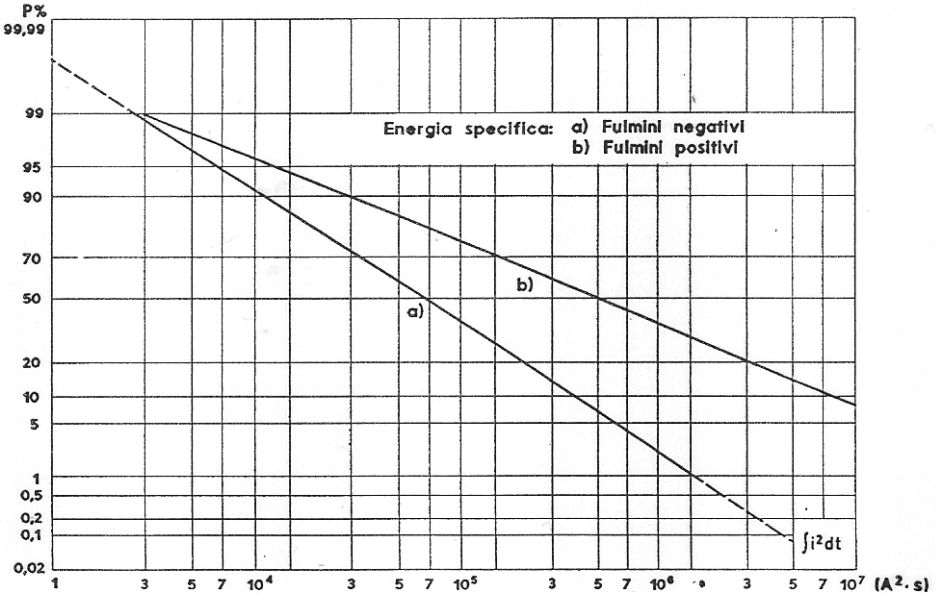
Alcuni dei parametri considerati dalle norme sono:

- ***il valore alla cresta;***
- ***la carica associata alla corrente di fulmine;***
- ***l'energia specifica.***

Nei grafici riportati nella pagina seguente l'ordinata P indica la probabilità con cui un dato valore in ascissa è uguagliato o superato. Con riferimento al primo grafico, ad esempio, si vede come il valore di cresta di 50 kA è raggiunto o superato dal 20% dei fulmini negativi, mentre il valore di 200 kA viene raggiunto o superato solo nell'1% dei casi.


P%
99,99
99
95
90
70
50
20
10
5
1
0,5
0,2
0,1
0,02
Corrente di cresta a) Fulmini negativi – Primi colpi
b) Fulmini positivi
a)
b)
I
1 3 5 7 10¹ 3 5 7 10² 3 5 7 10³ 3 5 7 10
(kA)


P%
99,99
99
95
90
70
50
20
10
5
1
0,5
0,2
0,1
0,02
Carica Elettrica a) Fulmini negativi b) Fulmini positivi
a)
b)
∫idt
1 3 5 7 10¹ 3 5 7 10² 3 5 7 10³ 3 5 7 10 (C)


P%
99,99
99
95
90
70
50
20
10
5
1
0,5
0,2
0,1
0,02
Energia specifica: a) Fulmini negativi
b) Fulmini positivi
b)
a)
∫i²dt
1 3 5 7 10⁴ 3 5 7 10⁵ 3 5 7 10⁶ 3 5 7 10⁷ (A².s)

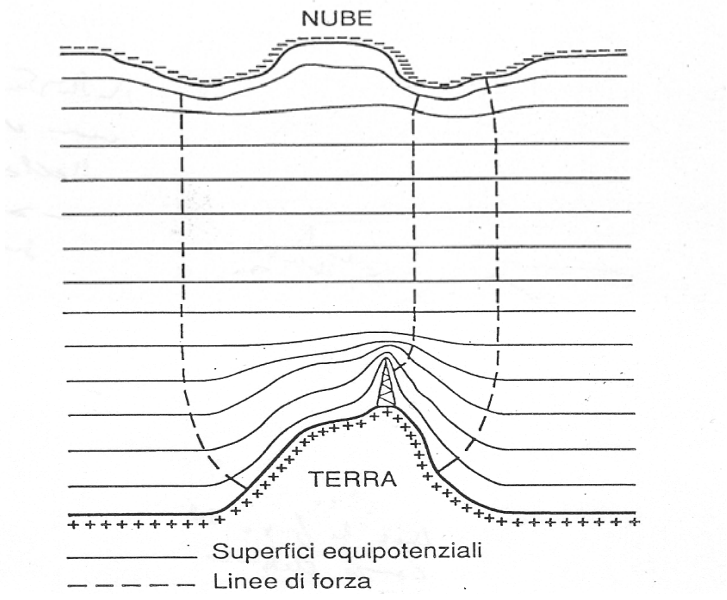
6.6 PROBABILITA' DI FULMINAZIONE DI UNA STRUTTURA

6.6.1 Fulmini discendenti

Si è detto che per la formazione del canale di fulmine è necessario che in una zona immediatamente adiacente alla nube il campo elettrico superi il valore critico in relazione alla rigidità dielettrica dell'aria. In queste condizioni ha origine un canale discendente che procede verso il basso seguendo un percorso del tutto casuale, condizionato soltanto dal grado di ionizzazione dell'aria che non è uniforme. In pratica, il canale di fulmine sceglie di volta in volta il percorso più "facile" interessando sempre zone più conduttive; essendo queste distribuite in modo casuale, pure a caso sarà la sua direzione di avanzamento a scatti.

Se si analizzano le linee di forza e le superfici equipotenziali del campo elettrostatico generato tra la nube e il suolo dalle cariche elettriche di segno opposto ivi accumulate, si comprende come nei primi stadi di formazione del canale di fulmine la presenza di una struttura al suolo non può avere alcuna influenza sulla direzione di avanzamento dello stesso. Le superfici equipotenziali, infatti, seguono la conformazione della nube e del suolo nelle rispettive vicinanze, mentre ad una certa distanza da entrambi diventano pressoché orizzontali (linee di forza verticali). Pertanto, il canale di fulmine procede inizialmente indisturbato fintanto che la testa del canale non viene influenzato dalla presenza di strutture al suolo, a causa della curvatura delle superfici equipotenziali e dell'addensamento delle linee di forza sopra e intorno ad esse; tale influenza è in genere confinata entro una zona di raggio non superiore all'altezza della struttura stessa. L'elemento fulminato è così quello sulla cui sommità il campo elettrico raggiunge per primo un valore sufficiente alla formazione della controscarica.

Per strutture particolarmente alte il campo elettrico raggiunge valori elevati non soltanto sulla sommità della struttura, ma anche lungo tutto il tronco terminale della struttura stessa, da cui ugualmente può avere origine la controscarica. Nel caso di strutture basse la differenza fra i valori raggiunti dal campo elettrico al suolo e sulla struttura è, in genere, tanto modesta che non esiste più una preferenza da parte del fulmine di colpire il suolo o la struttura; in tal caso la probabilità di fulminazione della struttura dipende dalle sue dimensioni in pianta. Pertanto, la presenza di una struttura al suolo non influenza il processo di formazione del fulmine, né può modificare la probabilità globale di fulminazione della zona in cui si trova la struttura. Influenza, invece, la distribuzione dei punti di caduta al suolo del fulmine.



6.6.2 Fulmini ascendenti

I fulmini ascendenti si manifestano sempre a seguito di scariche all'interno di una stessa nube o tra nubi diverse, le quali rinforzano il campo elettrico al suolo in modo da provocare una scarica e la formazione di un canale di fulmine ascendente. Punti preferenziali di partenza delle scariche ascendenti sono quelli che, in ragione della loro singolarità rispetto alla zona circostante, già di per se presentano elevati valori dell'intensità del campo elettrico, come nel caso di strutture o alberi molto alti o cime di rilievi montuosi. In assenza di punti singolari un fulmine ascendente a scarse probabilità di verificarsi. Quindi, la presenza di una struttura al suolo determina il processo di formazione del fulmine e, pertanto, influenza sia la probabilità di fulminazione della zona che il punto di fulminazione. In pratica, tutto ciò si verifica per strutture con altezza maggiore o uguale a 80 m.

6.7 AREA DI CAPTAZIONE E VOLUME PROTETTO

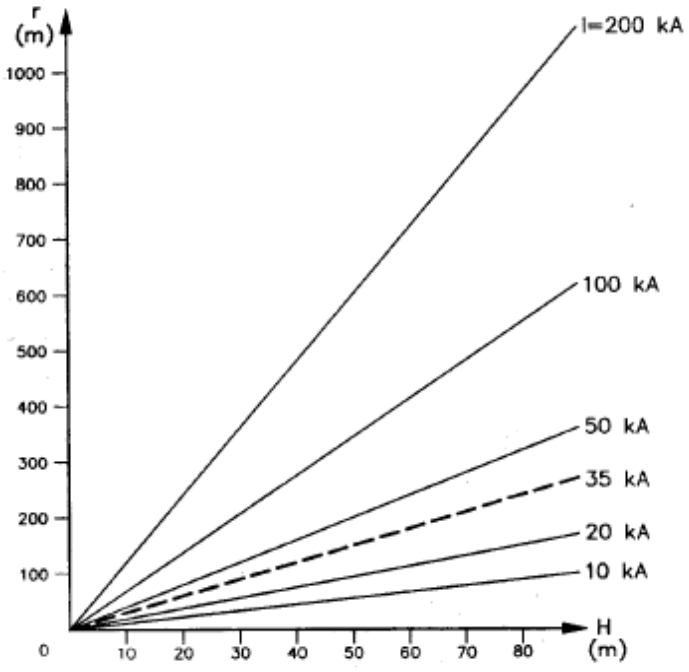
Per area di captazione si intende allora la zona circostante una struttura all'interno della quale i fulmini sono deviati sulla struttura stessa, anziché colpire il suolo o altre strutture. L'area di captazione, oltre che dalle caratteristiche della struttura (in particolare l'altezza), dipende anche dai parametri elettrici del fulmine e in particolare dalla corrente di fulmine. Infatti, quanto più intensa è la carica elettrica contenuta nel calale discendente tanto più rapidamente si raggiungerà sulla struttura il campo critico che fa partire la controscarica; ciò significa che si avranno lunghezze di controscarica tanto maggiori quanto maggiore è la carica trasportata dal canale di fulmine e la corrente associata alla scarica di ritorno. In altre parole i fulmini più intensi sono deviati sulla struttura da una distanza maggiore rispetto a quelli più deboli.

Si definisce pertanto ***raggio di captazione*** di una struttura la massima distanza alla quale un fulmine discendente viene captato dalla struttura stessa. Esso dipende dall'altezza della struttura ed è definibile soltanto in relazione ad un dato valore della corrente di fulmine.

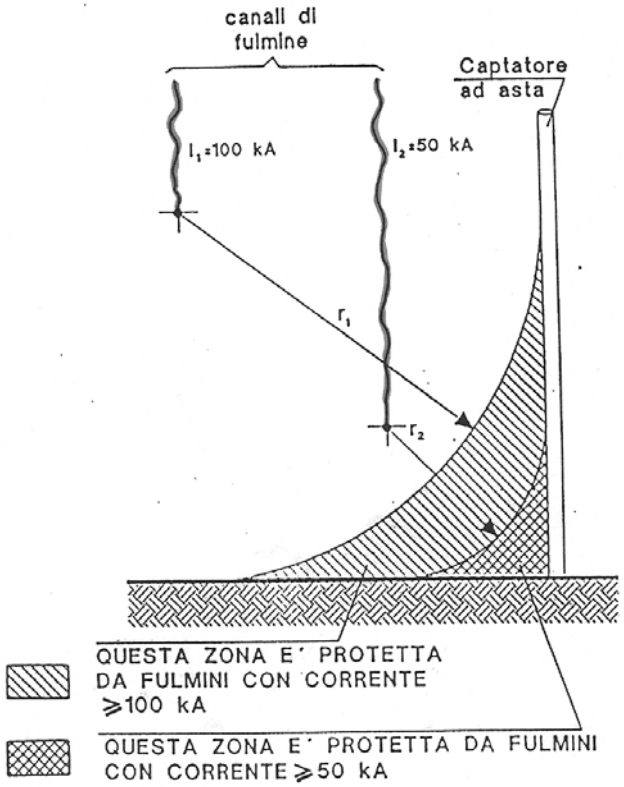
Il raggio di captazione *r* di un'asta verticale si può calcolare con la seguente formula empirica:

$$r = 0{,}175\, I^{0,8} H$$

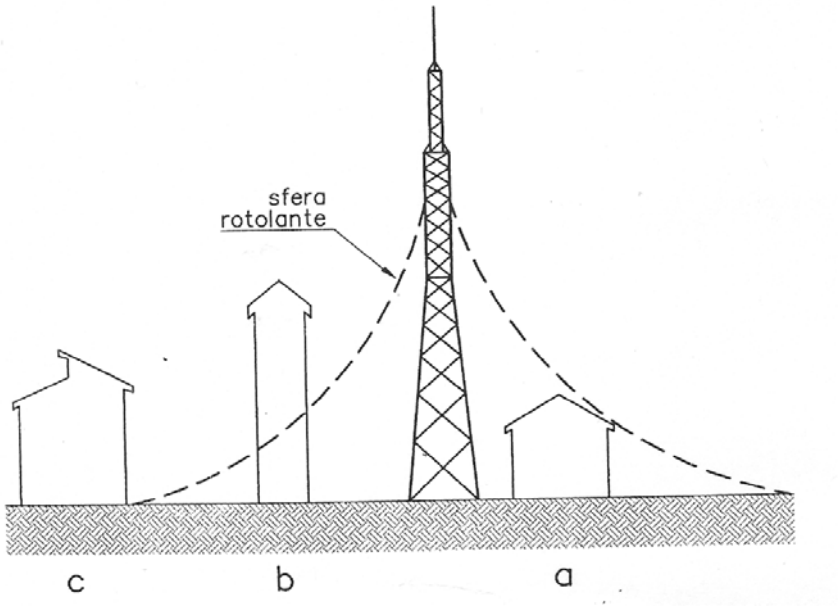
essendo I = 3÷200 kA la corrente di fulmine (valori sperimentali) e H l'altezza dell'asta.



Risulta così definibile anche il **volume protetto** da una struttura (ad esempio un'asta di captazione) come lo spazio che si assume non possa essere direttamente raggiunto dal fulmine caratterizzato da un determinato valore di corrente. Tale volume può essere individuato immaginando una sfera di raggio pari al raggio di captazione, associato alla struttura e alla corrente di fulmine considerata, che rotolando sulla superficie del terreno tocchi la superficie laterale della struttura come indicato nella figura seguente.


canali di fulmine
Captatore ad asta
I_1=100 kA
I_2=50 kA
r_1
r_2
QUESTA ZONA E' PROTETTA DA FULMINI CON CORRENTE ⩾100 kA
QUESTA ZONA E' PROTETTA DA FULMINI CON CORRENTE ⩾50 kA

Al di fuori del volume protetto da parte di una struttura nulla cambia per quanto riguarda la probabilità di fulminazione della zona. Con riferimento alla figura sottostante, ad esempio, per la presenza della struttura a torre molto alta la probabilità di fulminazione si annulla per l'edificio a) (*struttura autoprotetta*), diminuisce poco per l'edificio b), rimane invariata per l'edificio c).



6.8 MISURE DI PROTEZIONE CONTRO I FULMINI

Da quanto detto ne deriva che il fulmine è un evento di natura aleatoria e, pertanto, nei limiti di una spesa giustificata dai benefici conseguiti, nessun provvedimento può garantire la sicurezza assoluta per una struttura nei confronti del rischio di fulminazione. Dunque, la funzione di un impianto di protezione non può che essere quella di impedire che il fenomeno della fulminazione comporti un rischio inaccettabile per la struttura e per quanto da essa contenuto o da essa coinvolto.

Un fulmine può arrecare danno ad una struttura e al suo contenuto (esseri viventi o cose) sia direttamente, nel caso di *fulminazione diretta* della struttura, sia indirettamente, nel caso che colpisca un servizio entrante nella struttura (linee di energia o di segnale) o che colpisca un punto vicino alla struttura o al servizio entrante (*fulminazione indiretta*).

Le principali misure di protezione contro le fulminazioni sia dirette che indirette comprendono:

- *un impianto di protezione esterno* (**LPS)**[6], costituito da ***captatori***, ***calate*** e ***dispersori***;
- *un impianto di protezione interno***,** costituito da un **sistema di SPD**[7] e dai **collegamenti equipotenziali**.

Gli LPS e SPD vengono scelti in funzione del **livello di protezione LPL** (Lightning Protection Level), che deve essere attuato in base alla valutazione del rischio connesso alla fulminazione diretta ed indiretta. A tal fine le norme considerano quattro livelli di protezione **I**, **II**, **III** e **IV**, associati ad un gruppo di valori dei parametri della corrente di fulmine, relativi alla probabilità che i correlati valori massimo e minimo di progetto non siano superati in natura.

I **valori massimi** dei parametri della corrente di fulmine corrispondenti ai quattro livelli di protezione sono riportati nella tabella sottostante e sono impiegati per definire i componenti della protezione (sezione dei conduttori, caratteristiche degli SPD, distanze di sicurezza, ecc.).

Parametri della corrente	Livello di protezione		
	I	**II**	**II-IV**
Corrente impulsiva [kA]	200	150	100
Carica $Q_{impulsiva}$ [C]	100	75	50
Carica $Q_{lunga\ durata}$ [C]	200	150	100
Energia specifica W/R [MJ/Ω]	10	5,6	2,5
Tempi T_1/T_2 [μs /μs]	10/350		

Nella tabella seguente sono riportati invece i **valori minimi** dei parametri della corrente di fulmine corrispondenti ai quattro livelli di protezione e utilizzati per determinare il raggio della sfera rotolante ai fini del posizionamento degli organi di captazione dell'LPS.

Criteri di intercettazione			**Livello di protezione**			
	Simbolo	**Unità**	**I**	**II**	**III**	**IV**
Minimo valore della corrente di picco	*I*	kA	3	5	10	16
Raggio della sfera rotolante	*r*	m	20	30	45	60

(6) Acronimo di Lightning Protection System
(7) Acronimo di Surge Protective Device

Le misure di protezione specificate dalle norme sono pertanto efficaci contro i fulmini i cui parametri di corrente siano rispettivamente minori dei valori massimi e maggiori dei valori minimi definiti per il livello di protezione assunto nel progetto, secondo determinate probabilità.

Probabilità che i parametri della corrente di fulmine siano	Livello di protezione			
	I	II	III	IV
Inferiori ai valori massimi	0,99	0,98	0,97	0,97
Superiori ai valori minimi	0,99	0,97	0,91	0,84

6.9 IMPIANTO DI PROTEZIONE ESTERNO (LPS)

Per proteggere efficacemente una struttura dall'azione del fulmine occorre predisporre un sistema che offra una bassa resistenza al passaggio della corrente, al fine di limitare gli effetti termici, e che costituisca, quindi, una via preferenziale del fulmine verso terra. Deve presentare inoltre una bassa induttanza, per limitare il pericolo di scariche laterali, e una simmetria verso terra che gli permetta di ridurre il campo elettromagnetico all'interno del volume protetto.

Un sistema di protezione esterno è costituito fondamentalmente dai seguenti elementi:

- **Organi di captazione** (***captatori***)

  Sono le parti dell'impianto di protezione destinate a intercettare e ricevere direttamente la scarica dei fulmini che ricadono all'interno dell'area di captazione della struttura, salvaguardando la struttura stessa che si vuole proteggere. Possono essere costituiti da: ***elementi normali***, ossia appositamente installati, quali aste metalliche o conduttori disposti in vario modo a seconda delle dimensioni e della forma dell'edificio; ***elementi naturali***, ossia parti metalliche già esistenti per altri motivi nella costruzione, quali ferri di armatura, coperture metalliche, ecc.

  In base al tipo di captatore (*normale*) adottato, gli LPS sono classificati in:

  - **LPS ad aste verticali**, costituiti da una o più aste verticali poste sulla struttura da proteggere o nelle sue immediate vicinanze; adatti per strutture di modeste dimensioni in pianta;
  - **LPS a funi**, realizzati con una o più funi sospese al di sopra del volume da proteggere; adatti soprattutto per strutture di forma molto allungata e non particolarmente alte;
  - **LPS a maglie**, detti anche a gabbia di Faraday, costituiti da un complesso di conduttori tra loro connessi in modo da formare maglie di dimensioni opportune; adatti per strutture di grosse dimensioni e forma regolare, laddove l'aspetto estetico è anche importante.

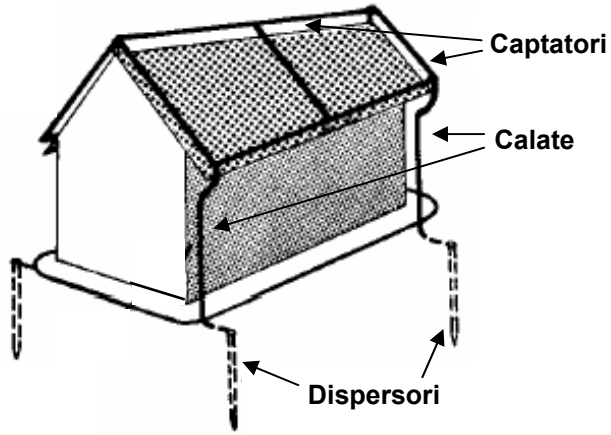
  Gli LPS possono anche essere composti da una qualsiasi combinazione dei tre tipi di captatori.

- **Organi di discesa** (***calate***)

  Sono costituiti da conduttori che hanno lo scopo di convogliare, secondo un percorso ben definito e di bassa resistenza elettrica, la corrente di fulmine dagli organi di captazione agli organi di dispersione. Anche gli organi di discesa possono essere *normali*, cioè costituiti da elementi appositamente installati, oppure *naturali*, ossia costituiti da parti metalliche già esistenti nella costruzione (tubazioni metalliche, ferri d'armatura, ecc.).

- **Organi di dispersione** (***dispersori***)

  Hanno lo scopo di facilitare la dispersione della corrente convogliata dagli organi di discesa nel terreno e di evitare la formazione sulla superficie dello stesso di gradienti di potenziale pericolosi.



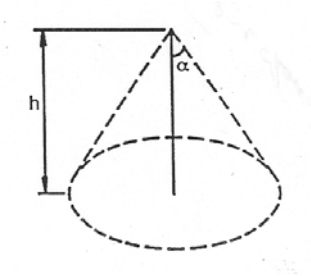
6.9.1 Posizionamento degli organi di captazione

La posizione dei captatori deve essere individuata seguendo uno dei tre metodi seguenti:

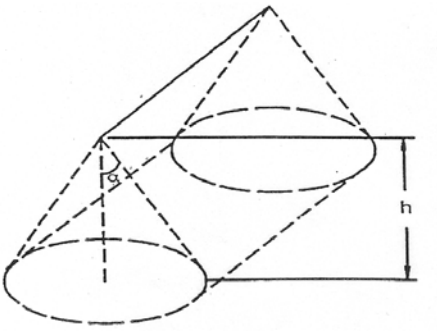
- ***metodo dell'angolo di protezione***, adatto per strutture di forma regolare;
- ***metodo dalla maglia***, adatto per strutture con superfici piane;
- ***metodo della sfera rotolante***, adatto per strutture di forma complessa.

- Metodo dell'angolo di protezione

Il posizionamento è corretto se la struttura da proteggere è interamente situata all'interno del volume protetto dal captatore. Si assume come volume protetto da un captatore ad asta quello racchiuso da un cono retto che ha il vertice coincidente con la sommità dell'asta e semiapertura α data in funzione dell'altezza dell'asta e del livello di protezione che si vuole realizzare.

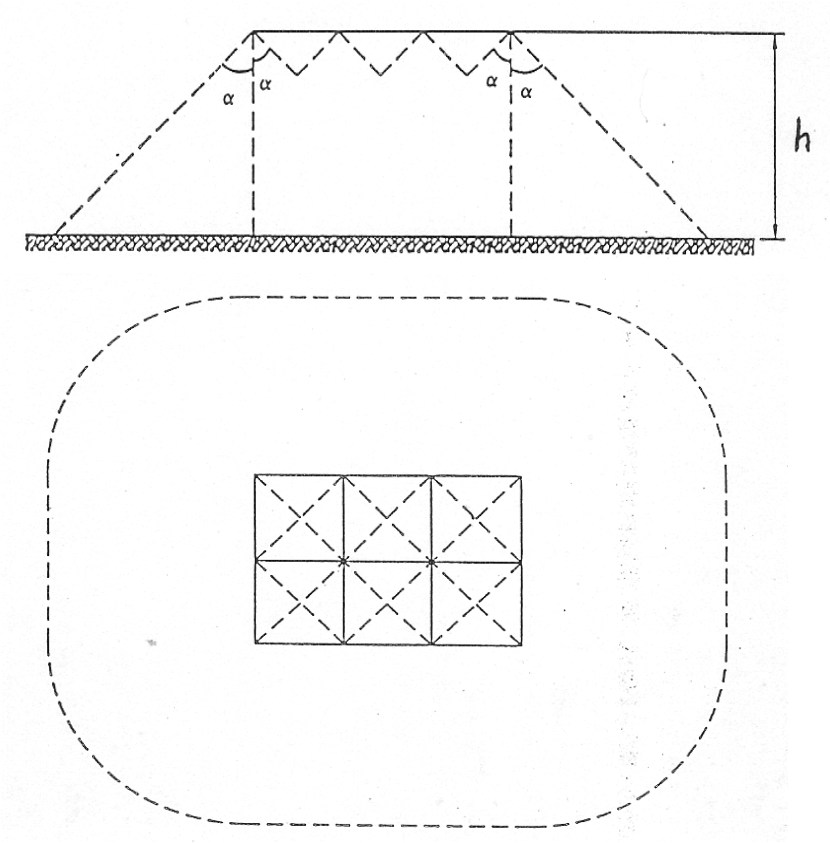


Il volume protetto da un captatore a fune è definito dalla composizione dei volumi protetti da tante aste virtuali verticali il cui vertice coincide con catenaria secondo cui si dispone la fune.



Il volume protetto da un captatore a maglie è definito dalla composizione dei volumi protetti determinati dai singoli conduttori costituenti i lati della maglia. È' ammesso che la struttura non sia tutta compresa nel volume protetto (tranne che per strutture con rischio di esplosione), perché è

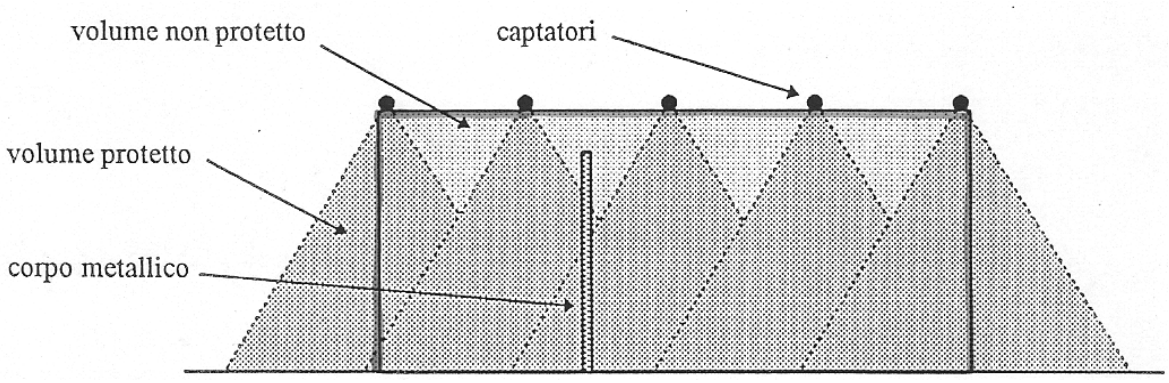
presumibile che la controscarica di un fulmine discendente o il canale di un fulmine ascendente parta da un conduttore di maglia.



- Metodo della maglia

Per la protezione di superfici piane, si assume che la maglia protegge l'intera superficie, su cui gli elementi di captazione possono essere direttamente poggiati[8], se gli stessi sono posizionati in corrispondenza degli spigoli di sommità e dei bordi perimetrali e a condizione che

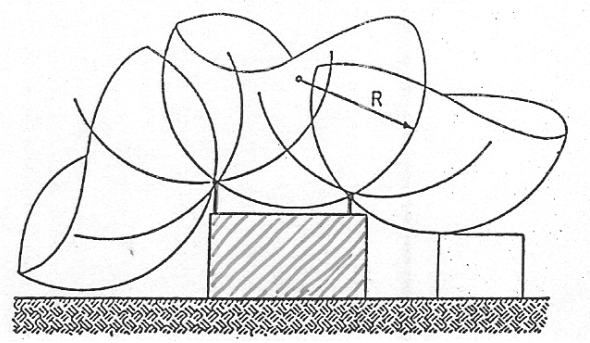
- il lato di magliatura non sia maggiore dei valori stabiliti in funzione del livello di protezione voluto;
- le superfici laterali della struttura a livelli più alti del valore della sfera rotolante siano dotate di captatori;
- nessun corpo metallico contenuto nella struttura da proteggere sporga al di fuori del volume protetto dai captatori nelle strutture con rischio di esplosione (v. figura).

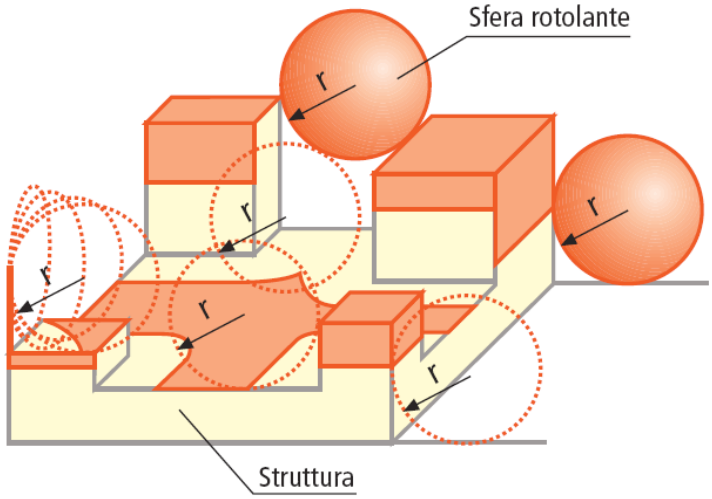


([8]) L'isolamento o distanziamento di sicurezza dell'LPS dalla struttura è richiesto solo nel caso di strutture realizzate con materiale facilmente infiammabile o con rischio di esplosione.

- Metodo della sfera rotolante

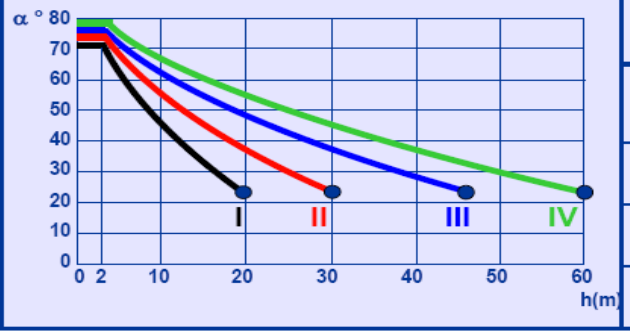
Il posizionamento dei captatori è corretto se nessun punto della struttura da proteggere viene in contatto con la sfera, il cui raggio è dato in funzione del livello di protezione, che rotola sul terreno intorno e sulla struttura in tutte le direzioni possibili.

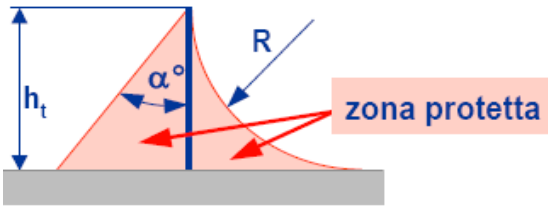




Valori dell'angolo di protezione, del raggio della sfera rotolante e delle dimensioni del lato di maglia in funzione del livello di protezione.

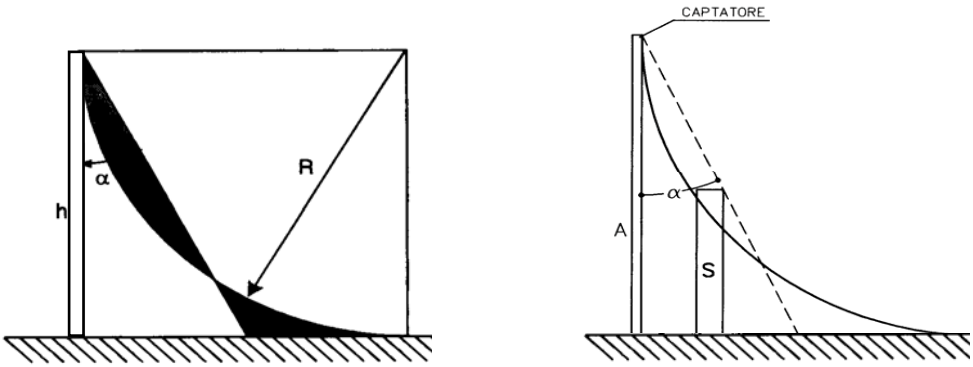
classe di LPS	raggio della sfera rotol. R	angolo di protezione α°	lato di maglia *M* (m)
I	20		5 x 5
II	30		10 x 10
III	45		15 x 15
IV	60		20 x 20





h: altezza da terra del dispositivo di captazione
R: raggio della sfera rotolante
α :angolo di protezione

L'angolo di protezione deriva direttamente dal metodo della sfera rotolante attraverso la rettificazione dell'arco di raggio R, tale che gli spazi protetti, per la sfera rotolante e per il cono di protezione, abbiano volumi uguali. Avvolte può essere più prudente utilizzare il metodo della sfera rotolante se la struttura da proteggere è alta ed il metodo dell'angolo di protezione dovesse risultare meno cautelativo, come in figura.



6.9.2 Posizionamento degli organi di discesa

Per ridurre la probabilità che il passaggio della corrente di fulmine nell'LPS possa provocare danni alla struttura occorre che:

- fra il punto di impatto e il suolo la corrente trovi più percorsi paralleli (calate);
- le calate abbiano la minima lunghezza possibile;
- siano realizzati tutti i collegamenti equipotenziali necessari al fine di evitare il verificarsi di scariche laterali pericolose all'interno della struttura (v. impianto di protezione interno).

La ripartizione della corrente di fulmine tra più calate comporta correnti più ridotte nelle singole calate e quindi una diminuzione della possibilità di scariche laterali e di sovratensioni sugli impianti interni.

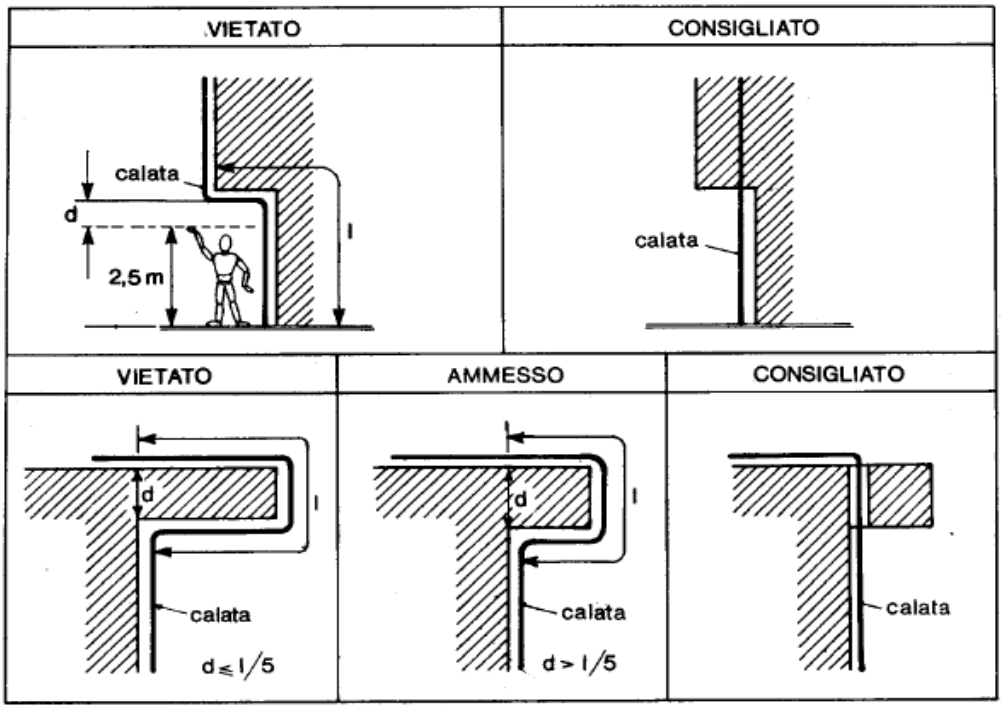
In dipendenza del tipo di captare, è prescritto un numero minimo di calate come appresso indicato:

- gli impianti di protezione ad aste verticali devono avere almeno una calata per ogni asta; nel caso una sola asta sono comunque consigliate due calate, nel rispetto di quanto detto sopra;
- gli impianti di protezione a funi devono avere almeno una calata per ciascuna estremità di fune;
- gli impianti di protezione a maglia devono possedere:
  - almeno una calata per ogni sostegno perimetrale della maglia, nel caso di LPS isolato dalla struttura da proteggere (v. nota 8 a pag. 15);
  - almeno due calate, disposte lungo il perimetro della maglia e possibilmente equidistanti fra loro e in corrispondenza degli angoli, nel caso di LPS non isolato dalla struttura da proteggere; è richiesto anche che le calate siano interconnesse a livello del suolo.

Le calate, inoltre, devono essere opportunamente distanziate tra loro e nel caso di edifici di notevole altezza devono essere previsti anelli intermedi di interconnessione (v. tabella seguente).

Classe dell'LPS	Distanze tipiche in metri
I	10
II	10
III	15
IV	20

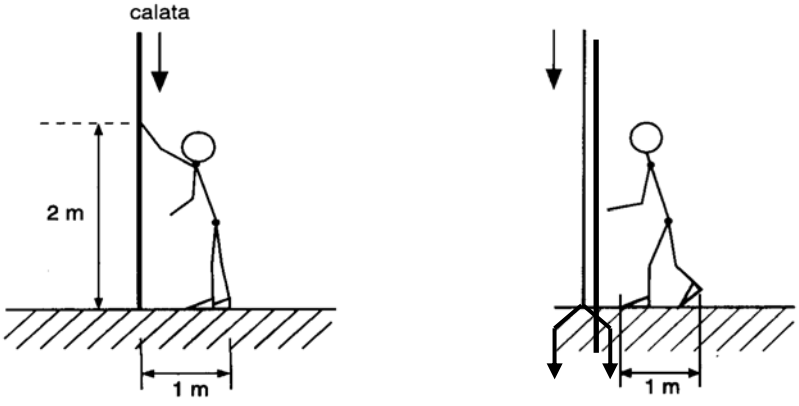
Le calate devono essere disposte, per quanto possibile, in prosecuzione degli organi di captazione, distanti da porte e finestre, in relazione alla possibilità di essere toccate da persone o che si manifestino scariche laterali pericolose. Devono inoltre avere un percorso rettilineo, evitando la formazioni di spire. Quando ciò non fosse possibile, è necessario che la distanza minima *d* fra due punti opposti della spira sia maggiore di 1/5 della lunghezza *l* del conduttore fra i due punti stessi, allo scopo di evitare la formazione di una scarica. Analogamente devono essere evitati percorsi non rettilinei in corrispondenza di zone ove l'eventuale presenza di una persona possa creare ulteriori percorsi per la corrente di fulmine che circola nelle calate.



In particolari condizioni, si possono verificare tensioni di contatto pericolose in prossimità dell'ultimo tratto discendente delle calate qualora sia prevedibile la presenza di persone, ad esempio in prossimità di vie di accesso o porte della struttura protetta.

Provvedimenti utili contro le tensioni di contatto per calate accessibili, nonché di passo per l'elevata corrente dispersa nel terreno, possono essere:

- calate protette con tubo di PVC di spessore almeno 3 mm o di altro materiale con equivalente grado di isolamento;
- aumento della resistività del suolo entro 3 metri dalla struttura mediante idonea pavimentazione, ad esempio: asfalto con spessore di almeno 5 cm o strato di ghiaia di spessore 15 cm.



6.9.3 Posizionamento degli organi di dispersione

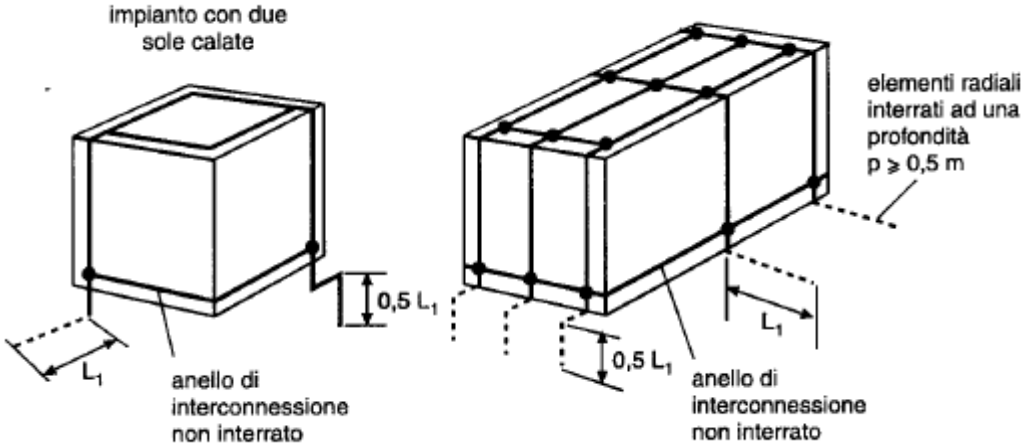
Dal punto di vista della protezione contro i fulmini è necessario realizzare un unico impianto di terra adatto per tutti gli scopi (LPS, protezione contro i contatti indiretti, ecc.). A tal fine, i dispersori dei vari impianti di terra devono essere interconnessi. La Norma definisce due tipi di dispersori: il tipo A e il tipo B.

- Dispersore di tipo A

Il dispersore di tipo A è costituito da elementi orizzontali o verticali, interrati e collegati a ciascuna calata, in numero non inferiore a due. La lunghezza di ciascun elemento non dovrà essere inferiore a:

- L_1 - per elementi orizzontali radiali, interrati ad una profondità di almeno 0,5 m;
- 0,5 L_1 - per elementi verticali (picchetti) o inclinati.

dove L_1 è dato in funzione della resistività del terreno e del livello di protezione dell'impianto (v. grafico pagina seguente).



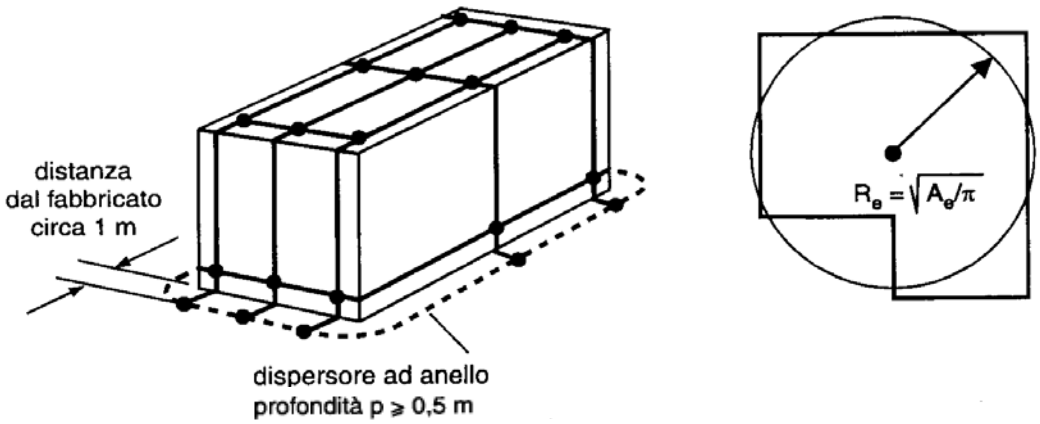
- Dispersore di tipo B

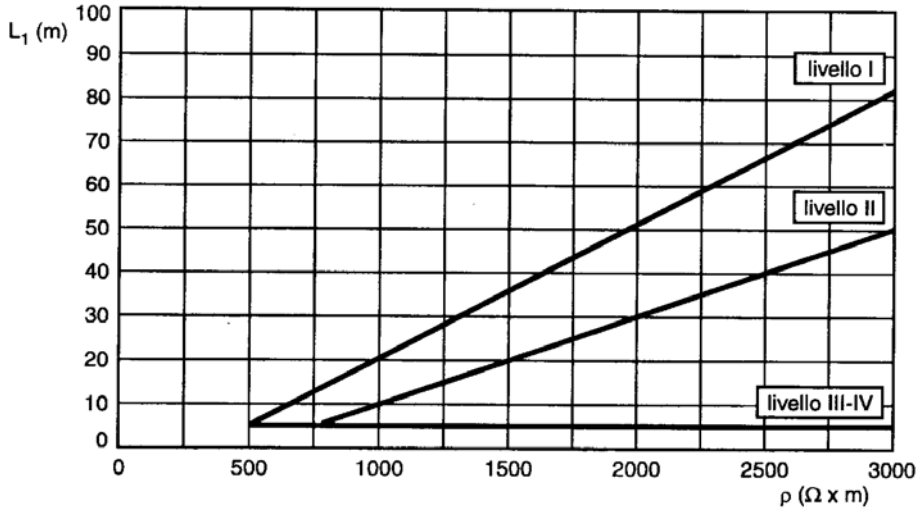
Sono considerati di tipo B i dispersori costituiti da un conduttore ad anello esterno alla struttura e interrato per almeno l'80% dell'intera lunghezza a una profondità di almeno 0,5 m.

Deve risultare: $R_e \geq L_1$

essendo R_e il raggio del cerchio equivalente all'area racchiusa dal dispersore.

Se l'anello risulta interrato per meno dell'80% della sua lunghezza, esso viene considerato come un dispersore di tipo A.





Lunghezza minima degli elementi dei dispersori di tipo A e B in funzione della resistività del suolo.

Per i livelli III e IV L_1 risulta indipendente dalla resistività del terreno. Dal grafico si vede inoltre che per terreni di resistività medio-bassa e fino a 500 Ωm, la lunghezza minima per gli elementi orizzontali dei dispersori di tipo A è 5 m, e per i picchetti 2,5 m (qualunque sia il livello di protezione). Analogamente, per dispersori di tipo B il raggio minimo del cerchio equivalente all'area racchiusa dal dispersore è 5 metri.

6.9.4 Scelta dei materiali e dimensioni minime degli elementi di un LPS

I materiali e le dimensioni minime dei diversi elementi che costituiscono l'LPS (captatori, calate e dispersori) sono indicati nella tabella seguente.

Materiale	Configurazione	Sezione minima (mm^2)	Commento
Rame	Nastro massiccio	50	2 mm di spessore min.
	Tondo massiccio	50	8 mm di diametro
	Cordato	50	1,7 mm di diam. min. di ciascun cond. elem.
	Tondo massiccio	200	16 mm di diametro
Rame stagnato	Nastro massiccio	50	2 mm di spessore min.
	Tondo massiccio	50	8 mm di diametro
	Cordato	50	1,7 mm di diam. min. di ciascun cond. elem.
Alluminio	Nastro massiccio	70	3 mm di spessore min.
	Tondo massiccio	50	8 mm di diametro
	Cordato	50	1,7 mm di diam. min. di ciascun cond. elem.
Lega di Alluminio	Nastro massiccio	50	2,5 mm di spessore min.
	Tondo massiccio	50	8 mm di diametro
	Cordato	50	1,7 mm di diam. min. di ciascun cond. elem.
	Tondo massiccio	200	16 mm di diametro
Acciaio zincato a caldo	Nastro massiccio	50	2,5 mm di spessore min.
	Tondo massiccio	50	8 mm di diametro
	Cordato	50	1,7 mm di diam. min. di ciascun cond. elem.
	Tondo massiccio	200	16 mm di diametro
Acciaio inossidabile	Nastro massiccio	50	2 mm di spessore min.
	Tondo massiccio	50	8 mm di diametro
	Cordato	70	1,7 mm di diam. min. di ciascun cond. elem.
	Tondo massiccio	200	16 mm di diametro

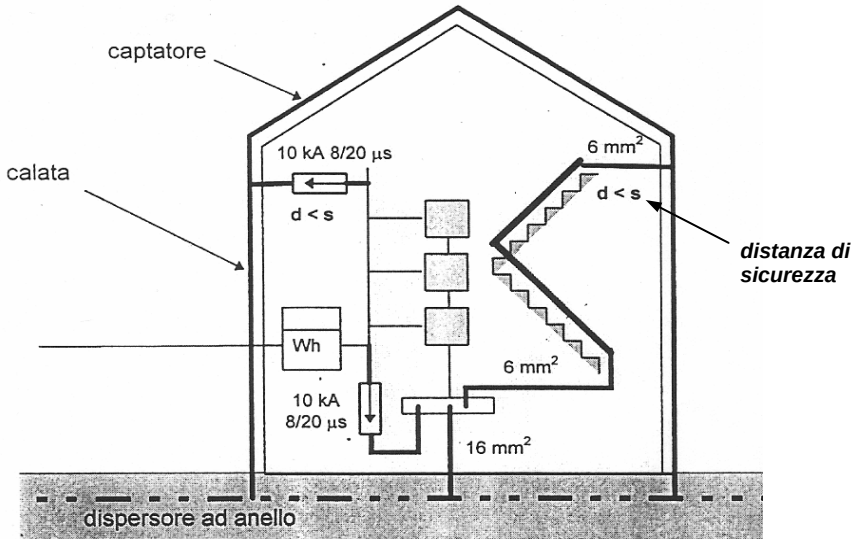
6.10 IMPIANTO DI PROTEZIONE INTERNO

L'impianto di protezione interno ha lo scopo di evitare il verificarsi di scariche pericolose all'interno della struttura da proteggere durante il passaggio della corrente di fulmine sull'LPS o in caso di fulminazione indiretta della struttura o di fulminazione diretta o indiretta di un servizio entrante.

Le scariche che si verificano tra l'LPS esterno da una parte ed i corpi metallici e gli impianti interni dall'altra sono pericolose specialmente per strutture con rischio di esplosione.

Queste scariche possono essere evitate mediante:

- **sistema di SPD coordinati**, insieme di scaricatori di sovratensione installati sulle linee di energia e di segnale entranti nella struttura, nonché tra gli impianti interni e gli elementi dell'LPS se posti a distanza inferiore da quella di sicurezza stabilita dalle norme. Gli SPD vanno opportunamente dimensionati in funzione del livello di protezione e delle caratteristiche fornite dal costruttore dell'SPD [9].
- **collegamenti equipotenziali** realizzati su tutti i corpi metallici entranti nella struttura e tra i corpi metallici interni e l'LPS quando le distanze sono inferiori alla distanza minima stabilita dalle norme.



([9]) Devono comunque avere: capacità di scarica di almeno 10 kA, forma d'onda 8/20 μs e tensione d'innesco coordinata con l'isolamento richiesto

CAPITOLO 7

APPLICAZIONE LA NORMA CEI 81-10 PER LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO DI FULMINAZIONE

7.1 INTRODUZIONE

La Norma **CEI 81-10,** riguardante la protezione delle strutture contro i fulmini, è stata pubblicata nell'aprile del 2006 ed è costituita da quattro parti che recepiscono altrettante norme europee:

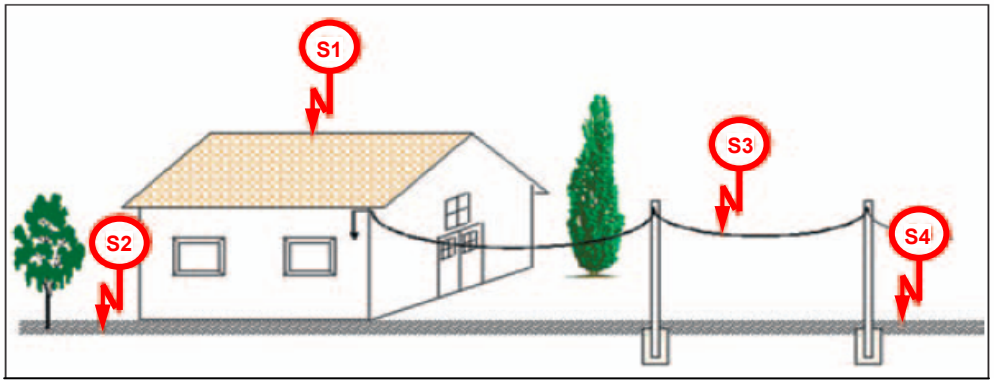
- **CEI 81-10/1** (EN 62305-1) "Protezione contro i fulmini. Parte 1: Principi Generali". Contiene i principi generali per la protezione contro i fulmini e introduce i parametri della corrente di fulmine e i relativi tipi di danno; illustra la necessità o la convenienza economica della protezione, le misure di protezione da adottare e i criteri per la protezione di strutture e servizi;
- **CEI 81-10/2** (EN 62305-2) "Protezione contro i fulmini. Parte 2: Valutazione del rischio". Fornisce il metodo di analisi del rischio dovuto al fulmine al fine di stabilire la necessità o la convenienza economica della protezione;
- **CEI 81-10/3** (EN 62305-3) "Protezione contro i fulmini. Parte 3: Danno materiale alle strutture e pericolo per le persone". Contiene i criteri per la progettazione, l'installazione e la manutenzione delle misure di protezione contro il fulmine per ridurre il rischio di danno alle persone e/o alle cose;
- **CEI 81-10/4** (EN 62305-4) "Protezione contro i fulmini. Parte 4: Impianti elettrici ed elettronici nelle strutture". Contiene i criteri per la progettazione, l'installazione e la manutenzione delle misure di protezione per ridurre i danni agli impianti elettrici ed elettronici all'interno delle strutture.

7.2 SORGENTI E TIPI DI DANNO DOVUTI AL FULMINE

Un fulmine può causare danni a una struttura perché la colpisce direttamente, oppure perché colpisce i servizi entranti nella struttura stessa (ad es. linee di energia o di segnale) o infine perché cade a terra in prossimità della struttura o dei servizi suddetti.

Le norme individuano pertanto quattro possibili sorgenti di danno (**S**) in dipendenza del punto di impatto del fulmine:

- **S1**: fulmine sulla struttura (*fulminazione diretta*);
- **S2**: fulmine in vicinanza della struttura (*fulminazione indiretta*);
- **S3**: fulmine sui servizi entranti nella struttura (*fulminazione diretta di una linea di energia e/o di segnale entrante nella struttura*);
- **S4**: fulmine in prossimità di servizi entranti nella struttura (*fulminazione indiretta di una linea di energia e/o di segnale entrante nella struttura*).



Si può notare come tra i servizi entranti nella struttura le norme considerano solamente le linee, di energia o di segnale, e non le tubazioni di qualsiasi genere entranti nella struttura; queste ultime, se di materiale conduttore, devono essere collegate al nodo principale di terra della struttura e pertanto si ritiene che la loro eventuale fulminazione, diretta o indiretta, non possa arrecare danni all'interno della struttura.

A seconda della sorgente di danno **S**, ovvero del punto d'impatto del fulmine, si possono avere tre tipi di danno (**D**):

- **D1**: danni ad esseri viventi, essenzialmente morte o lesioni di persone e/o animali dovute a tensioni di contatto e di passo causate dalla corrente di fulmine;
- **D2**: danni materiali (incendio, esplosione, distruzioni meccaniche, rilascio di sostanze chimiche nocive, ecc.) dovuti alla corrente di fulmine attraverso la struttura e alle scariche laterali;
- **D3**: guasti a impianti elettrici ed elettronici interni dovuti all'impulso elettromagnetico del fulmine (*LEMP, lightning electromagnetic pulse*).

I fulmini che si abbattono sulla struttura o su un sevizio entrante nella stessa (sorgenti di danno **S1** e **S3**) possono causare tutti e tre i tipi di danno (**D1**, **D2**, **D3**).

I fulmini che si abbattono in prossimità della struttura o di un sevizio entrante nella stessa (sorgenti di danno **S1** e **S3**) possono causare danni di tipo **D3** dovuti alle sovratensioni originate dall'accoppiamento induttivo della corrente di fulmine con le linee.

7.3 TIPI DI PERDITA E RISCHI DOVUTI AL FULMINE

Ognuno dei tre i tipi di danno sopra definiti, da solo o in combinazione con gli altri, può produrre perdite (**L**) di natura diversa a seconda della tipologia, dell'utilizzo e delle caratteristiche della struttura.

A ciascun tipo di perdita è associato un rischio (**R**), che è il valore della probabile perdita (persone, animali e cose) causata dal fulmine nel periodo di tempo considerato (in genere un anno).

I tipi di perdita previsti dalle norme e i relativi rischi sono:

- **L1**: perdita di vite umane (*Rischio* $\boldsymbol{R_1}$);
- **L2**: perdita di servizio pubblico (*Rischio* $\boldsymbol{R_2}$);
- **L3**: perdita di patrimonio culturale insostituibile (*Rischio* $\boldsymbol{R_3}$);
- **L4**: perdita economica (*Rischio* $\boldsymbol{R_4}$).

Le perdite di tipo **L1**, **L2** e **L3** hanno carattere sociale in quanto interessano l'intera collettività; la perdita di tipo **L4** riguarda invece soltanto chi la subisce. Per tale motivo le norme impongono la valutazione di **L1**, **L2**, **L3** confrontando il relativo rischio con quello tollerabile ($\mathbf{R_T}$) stabilito dalle stesse norme.

Resta facoltativa invece la valutazione di **L4** e l'accettazione o meno delle relative perdite economiche.

7.3.1 Rischio tollerabile R_T

Per la decisione sulla scelta delle misure di protezione contro i fulmini occorre verificare se il rischio **R** relativo ai tipi di perdita **L1**, **L2**, **L3** supera o meno il valore di rischio tollerabile $\mathbf{R_T}$ i cui valori massimi tollerabili per ciascun tipo di perdita sono quelli riportati nella Tabella seguente.

Tipi di perdita		R_T
L1	perdita di vite umane (lesione o morte di persone)	10^{-5}/anno
L2	perdita di servizio pubblico	10^{-3}/anno
L3	perdita di patrimonio culturale insostituibile	10^{-3}/anno

7.3.2 Componenti di rischio

Per ogni tipo di perdita, il rischio corrispondente è dato dalla somma di più rischi parziali chiamati "componenti di rischio", classificate per sorgente di danno e per tipo di danno.

***R_A* -** E' relativa ai danni ad esseri viventi per tensioni di contatto e di passo dovute a un fulmine diretto sulla struttura (S1), in una fascia di 3 m all'esterno della struttura. All'interno tale rischio è ritenuto trascurabile. Le possibili perdite sono **L1** e **L4** (perdita di animali, se struttura agricola).

***R_B* -** Riguarda i danni materiali causati da incendi, esplosioni, effetti meccanici e chimici causati da fulminazione diretta della struttura (S1). Le perdite che si possono avere sono **L1**, **L2** (se la struttura è adibita a servizio pubblico), **L3** (se la struttura è adibita a museo o attività simili) e **L4**.

***R_C* -** Si riferisce ai danni a impianti interni della struttura, ossia l'avaria di apparecchiature elettriche ed elettroniche, causati dal LEMP originato dalla corrente di fulmine che colpisce la struttura (S1). Le possibili perdite sono **L1** se la struttura è a rischio di esplosione, o è un ospedale o comunque se le avarie possono essere di immediato pericolo per le persone, **L2** e **L4**.

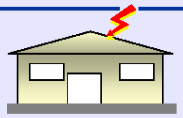
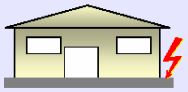
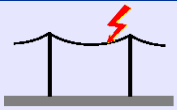
***R_M* -** Considera i danni a impianti interni della struttura causati dal LEMP originato dalla corrente di fulmine in prossimità della struttura (S2). Le possibili perdite sono **L1**, **L2** e **L4** (come R_C).

***R_U* -** Attiene i danni ad esseri viventi per tensioni di contatto e di passo all'interno della struttura, dovute ai fulmini diretti su una linea entrante (S3). Le possibili perdite sono **L1** e **L4** (come R_A).

***R_V* -** E' relativa ai danni materiali causati da incendi e/o esplosioni innescati da scariche pericolose per fulmini diretti su linee entranti (S3). Le possibili perdite sono **L1**, **L2**, **L3** e **L4** (come R_B).

***R_W* -** Considera i danni a impianti interni della struttura causati dal LEMP originato dalla corrente di fulmine diretto su una linea (S3). Le perdite che si possono avere sono **L1**, **L2** e **L4** (come R_C).

***R_Z* -** Riguarda i danni a impianti interni della struttura causati dal LEMP originato dalla corrente di fulmine in prossimità di una linea (S4). Le possibili perdite sono **L1**, **L2** e **L4** (come R_C).

Scarica	Esempio	Sorgente di danno	Tipo di danno	Tipo di perdita	Componenti di rischio
sulla struttura		S1	D1 D2 D3	L1, L4 [b] L1, L2, L3, L4 L1[a], L2, L4	R_A, R_B, R_C
in prossimità della struttura		S2	D3	L1[a], L2, L4	R_M
sui servizi entranti nella struttura		S3	D1 D2 D3	L1, L4 [b] L1, L2, L3, L4 L1[a], L2, L4	R_U, R_V, R_W
in prossimità di un servizio		S4	D3	L1[a], L2, L4	R_Z

[a] Solo con strutture con rischio di esplosione e per ospedali o altre strutture analoghe
[b] Nel caso di perdita di animali

7.4 VALUTAZIONE DEL RISCHIO DI FULMINAZIONE

Ciascuna componente di rischio $\mathbf{R_A}$, $\mathbf{R_B}$, $\mathbf{R_C}$, $\mathbf{R_M}$, $\mathbf{R_U}$, $\mathbf{R_V}$, $\mathbf{R_W}$, e $\mathbf{R_Z}$, può essere calcolata mediante la seguente espressione generale del rischio:

$$R_x = N P_x L_x$$

dove:

N è il numero di eventi pericolosi annui, ovvero il numero di fulmini che possono interessare la struttura in un anno. In dipendenza della sorgente di danno si ha:

N_D *= numero annuo di eventi pericolosi per fulminazione diretta della struttura;*

N_M *= numero annuo di eventi pericolosi per fulminazione in prossimità della struttura;*

N_L *= numero annuo di eventi pericolosi per fulminazione sul servizio entrante dall'esterno;*

N_I *= numero annuo di eventi pericolosi per fulminazione in prossimità del servizio.*

P_x è la probabilità di danno, ovvero la probabilità che un fulmine provochi una determinata perdita;

L_x è l'entità media della perdita relativa ad un particolare tipo di danno.

Per ciascun tipo di perdita, ai fini della valutazione del rischio, occorre dunque determinare i parametri $\mathbf{N}$, $\mathbf{P_x}$ e $\mathbf{L_x}$ per tutte le componenti di rischio rilevanti; il valore totale del rischio è la somma delle componenti di rischio considerate ($\mathbf{R = \Sigma R_x}$). Le componenti di rischio da considerare per ciascun tipo di perdita sono:

- Perdita di vite umane (L1):

$$\mathbf{R_1 = R_A + R_B + R_C^{(1)} + R_M^{(1)} + R_U + R_V + R_W^{(1)} + R_Z^{(1)}}$$

(1) solo nel caso di struttura con rischio di esplosione, ospedale o di altre strutture in cui i guasti di impianti interni e apparecchiature provocano immediato pericolo per le persone.

- Perdita di servizio pubblico (L2):

$$\mathbf{R_2 = R_B + R_C + R_M + R_V + R_W + R_Z}$$

- Perdita di patrimonio culturale insostituibile (L3):

$$\mathbf{R_3 = R_B + R_V}$$

- Perdita economica (L4):

$$\mathbf{R_4 = R_A^{(2)} + R_B + R_C + R_M + R_U^{(2)} + R_V + R_W + R_Z}$$

(2) solo in strutture ad uso agricolo in cui si può verificare la perdita di animali.

Per ciascun rischio considerato se $\mathbf{R \leq R_T}$ (rischio tollerabile) la protezione contro i fulmini non è necessaria; se $\mathbf{R > R_T}$ devono essere adottate misure di protezione al fine di rendere $\mathbf{R \leq R_T}$ per il rischio considerato.

Un'eccezione costituisce la valutazione delle perdite economiche. In questo caso non esiste un rischio accettabile; per i danni di tipo economico infatti la protezione va giustificata unicamente sotto l'aspetto della convenienza economica.

7.4.1 Calcolo del numero medio annuo di eventi pericolosi N

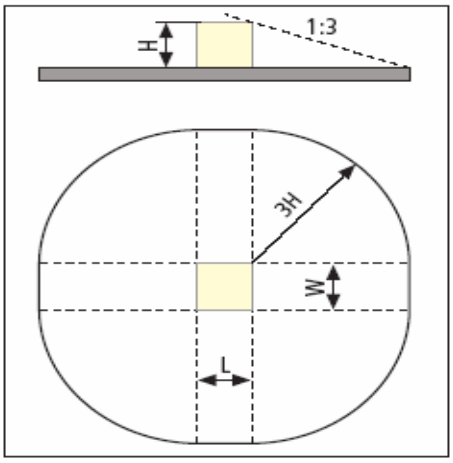
Per il calcolo di $\mathbf{N_D}$ viene utilizzata la seguente relazione:

$$N_D = N_g A_d C_d 10^{-6}$$

dove:

N_g è il numero di fulmini a terra all'anno e per chilometro quadrato della zona ove è situata la struttura ed è ricavabile dalla **Guida CEI 81-3** "*Valori medi del numero dei fulmini a terra per anno e per chilometro quadrato dei Comuni d'Italia, in ordine alfabetico*";

A_d è l'area di raccolta della struttura supposta isolata e in terreno pianeggiante, data dall'area racchiusa dalla linea ottenuta dall'intersezione del terreno con una retta di pendenza 1/3 che facendo perno sulle parti superiori della struttura ruoti intorno alla struttura stessa; per una struttura a forma di parallelepipedo come nella figura accanto si ha:



$$A_d = L \times W + 6H \times (L + W) + 9\,\pi\,(H)^2$$

C_d è il coefficiente di posizione, con il quale si considerano gli effetti dell'ambiente circostante (altre costruzioni vicine, presenza di alberi, ecc.), ricavabile da Tabella.

Ubicazione relativa della struttura	C_d
Oggetto circondato da oggetti di altezza più elevata o da alberi	0,25
Oggetto circondato da oggetti o alberi di altezza uguale o inferiore	0,5
Oggetto isolato: nessun altro oggetto nelle vicinanze (entro 3H)	1
Oggetto isolato sulla cima di una collina o di una montagna	2

In maniera analoga si calcolano le altre frequenze di fulminazione $\mathbf{N_M}$, $\mathbf{N_L}$, $\mathbf{N_I}$ seguendo le modalità descritte nell'Allegato A della Norma CEI 81-10/2 a cui si rimanda per maggiori dettagli.

7.4.2 Calcolo della probabilità di danno P_x

Il valore della probabilità $\mathbf{P_x}$ che un fulmine provochi il danno nella struttura considerata potrà essere al massimo 1, in dipendenza delle caratteristiche della struttura e delle misure di protezione adottate. Vengono definiti a tal fine otto tipi di probabilità di danno, ciascuna corrispondente ad una componente di rischio: $\mathbf{P_A}$, $\mathbf{P_B}$, $\mathbf{P_C}$, $\mathbf{P_M}$, $\mathbf{P_U}$, $\mathbf{P_V}$, $\mathbf{P_W}$, e $\mathbf{P_Z}$.

Le probabilità di danno possono essere dedotte direttamente dalle tabelle riportate nell'Allegato B della Norma CEI 81-10/2, oppure come risultato della combinazione di ulteriori fattori.

A titolo di esempio, si riportano di seguito le tabelle relative alle probabilità di danno $\mathbf{P_A}$, $\mathbf{P_B}$ e $\mathbf{P_C}$. In relazione a quest'ultima, in particolare, la probabilità che un fulmine su una struttura causi guasti negli impianti interni dipende dal sistema di SPD che è stato installato per cui nella Norma viene posto $\mathbf{P_C = P_{SPD}}$.

Valori di probabilità P_A che un fulmine diretto sulla struttura provochi danno ad esseri viventi per tensioni di contatto e di passo.

Misure di protezione	P_A
Nessuna misura di protezione	1
Isolamento elettrico delle calate (es. almeno 3 mm di polietilene reticolato)	10^{-2}
Equipotenzializzazione del suolo	10^{-2}
Cartelli ammonitori	10^{-1}

Valori di probabilità P_B che un fulmine diretto sulla struttura causi danno materiale in funzione delle misure di protezione adottate.

Caratteristiche della struttura	Classe dell'LPS	P_B
Struttura non protetta con LPS	–	1
Struttura protetta con LPS	IV	0,2
	III	0,1
	II	0,05
	I	0,02
Struttura con sistema di captazione conforme ad un LPS di Classe I e con uno schermo metallico continuo o organi di discesa costituiti dai ferri d'armatura del calcestruzzo		0,01
Struttura con copertura metallica od organi di captazione, eventualmente comprendenti componenti naturali, atti a garantire una completa protezione contro la fulminazione diretta di ogni installazione sulla copertura e con organi di discesa costituiti dai ferri d'armatura del calcestruzzo		0,001

Valori di P_{SPD} che un fulmine diretto sulla struttura causi guasti negli impianti interni in funzione del livello di protezione (LPL) per cui sono stati progettati gli SPD.

LPL	P_{SPD}
Sistema di SPD coordinati assente	1
III – IV	0,03
II	0,02
I	0,01
SPD aventi caratteristiche migliori rispetto ai requisiti richiesti per l'LPL I (attitudine a sopportare correnti più elevate, livello di protezione inferiore, ecc.)	0,005 - 0,001

7.4.3 Calcolo della perdita media annua L_x

L'entità media $\mathbf{L_x}$ della perdita conseguente alla fulminazione è funzione di:

- destinazione d'uso della struttura;
- presenza e tempo di permanenza di persone;
- valore economico della struttura, del suo contenuto e delle attività ivi svolte;
- misure di protezione adottate per limitare il danno;
- particolari fattori che possono amplificare il danno.

La perdita $\mathbf{L_x}$ varia con il tipo di perdita considerata (**L1**, **L2**, **L3** e **L4**) e, per ciascun tipo di perdita,

con il tipo di danno (**D1**, **D2** e **D3**) che ha provocato la perdita. Vengono adottati i seguenti simboli:

$\mathbf{L_t}$ è la perdita per danni ad esseri viventi dovuta a tensioni di contatto e di passo;

$\mathbf{L_f}$ è la perdita dovuta a danno materiale;

$\mathbf{L_o}$ è la perdita dovuta ai guasti degli impianti interni.

- Perdita di vite umane L1

I valori medi tipici di $\mathbf{L_t}$, $\mathbf{L_f}$ e $\mathbf{L_o}$ possono essere dedotti, in dipendenza del tipo di struttura, attraverso le seguenti tabelle riportate nell'Allegato C della Norma CEI 81-10/2:

Valori medi tipici di L_t, L_f e L_o.

Tipo di struttura	L_t
Tutti il tipi – (persone all'interno dell'edificio)	10^{-4}
Tutti il tipi – (persone all'esterno dell'edificio)	10^{-2}

Tipo di struttura	L_f
Ospedali, alberghi, civile abitazione	10^{-1}
Industriale, commerciale, scuole	$5 \cdot 10^{-2}$
Pubblico spettacolo, chiese, musei	$2 \cdot 10^{-2}$
Altri	10^{-2}

Tipo di struttura	L_o
Rischio di esplosione	10^{-1}
Ospedali	10^{-3}

La perdita di vite umane viene valutata utilizzando delle espressioni che tengono conto delle caratteristiche della struttura tramite dei coefficienti di riduzione (r_a, r_p, r_u, r_f) e di incremento (h_z) quantificabili anch'essi a mezzo di apposite tabelle:

$$\mathbf{L_A = r_a \times L_t}$$

$$\mathbf{L_B = L_V = r_p \times h_z \times r_f \times L_f}$$

$$\mathbf{L_U = r_u \times L_t}$$

$$\mathbf{L_C = L_M = L_W = L_Z = L_o}$$

Valori dei coefficienti di riduzione r_a e r_u in funzione del tipo di superficie del suolo (r_a) o della pavimentazione (r_u).

Tipo di superficie	Resistenza di contatto (k Ω)(1)	r_a e r_u
Agricolo, cemento	< 1	10^{-2}
Marmo, ceramica	1 – 10	10^{-3}
Pietrisco, moquette, tappeto	10 – 100	10^{-4}
Asfalto, linoleum, legno	>100	10^{-5}
(1) Valori misurati tra un elettrodo di 400 cm^2 premuto con una forza di 500 N ed un punto all'infinito.		

Valori del coefficiente di riduzione r_p in funzione delle misure atte a ridurre le conseguenze di un incendio

Misure adottate	r_p
Nessuna misura	1
Una delle seguenti misure: estintori; impianto fisso di estinzione operato manualmente; impianto di allarme manuale; idranti; compartimentazione antincendio; vie di fuga protette	0,5
Una delle seguenti misure: impianto fisso di estinzione operato automaticamente; impianto di allarme automatico(1)	0,2
(1) Solo se protetto contro le sovratensioni ed altri danneggiamenti e se la squadra antincendio può intervenire in meno di 10 minuti.	

Valori del coefficiente di riduzione r_f in funzione del rischio d'incendio della struttura(*)

Rischio d'incendio	r_f
Esplosione	1
Elevato	10^{-1}
Ordinario	10^{-2}
Ridotto	10^{-3}
Nessuno	0

(*) ***Rischio d'incendio elevato***: strutture con carico specifico di incendio maggiore di 800 Mj/m^2 o strutture realizzate con materiali combustibili o aventi coperture realizzate con materiale combustibile.

Rischio d'incendio ordinario: strutture con carico specifico di incendio compreso tra 800 Mj/m^2 e 400 Mj/m^2 .

Rischio d'incendio ridotto: strutture con carico specifico di incendio inferiore a 400 Mj/m^2 o che contengono solo occasionalmente materiali combustibili.

Per *carico specifico di incendio* si intende il rapporto tra l'energia del quantitativo totale di materiale combustibile nella struttura e la superficie complessiva della struttura stessa.

Valori del coefficiente di incremento h_z della perdita in presenza di particolari pericoli

Tipo di pericolo particolare	h_z
Nessuno	1
Livello ridotto di panico (p.e.: struttura limitata a due piani ed un numero di persone inferiore a 100)	2
Livello medio di panico (p.e.: strutture destinate ad eventi culturali o sportivi con un numero di partecipanti compreso tra 100 and 1000 persone)	5
Difficoltà di evacuazione (p.e.: strutture con presenza di persone impossibilitate a muoversi, ospedali)	5
Livello elevato di panico (p.e.: strutture destinate ad eventi culturali o sportivi con un numero di partecipanti maggiore di 1000 persone)	10
Pericolo per strutture circostanti o per l'ambiente	20
Contaminazione dell'ambiente circostante	50

- Altri tipi di perdita

In maniera analoga si calcolano gli altri tipi di perdita ***L2***, ***L3*** e ***L4*** seguendo le modalità descritte nell'Allegato C della Norma CEI 81-10/2.

7.5 ESEMPI DI VALUTAZIONE DEL RISCHIO

Alcuni esempi applicativi di valutazione del rischio di fulminazione di strutture, per la decisione sulla scelta delle misure di protezione, sono riportati nell'Allegato H della Norma CEI 81-10/2 alla quale si rimanda per ulteriori approfondimenti.